



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LEONARDO JOSÉ MONCAYO URIBE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA
TRANSLÚCIDA COM FIBRA ÓTICA POLIMÉRICA**

**Florianópolis
2010**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LEONARDO JOSÉ MONCAYO URIBE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA
TRANSLÚCIDA COM FIBRA ÓTICA POLIMÉRICA**

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Mestre em
Construção Civil.

Orientador: Prof. Wellington Longuini
Repetto, Ph.D.

**Florianópolis
2010**

LEONARDO JOSÉ MONCAYO URIBE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS
TRANSLÚCIDAS COM FIBRA ÓTICA POLIMÉRICA**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 9 Dezembro 2010

Prof^a. Dr. Janaíde Cavalcante (Coordenadora do PPGEC)

Prof. Dr. Wellington L. Repette (orientador)

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Arnaldo M. Pereira Carneiro (UFPE)

Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize (UFSC)

Prof. Dr. Vicente de Paulo Nicolau (UFSC)

*Aos meus pais,
Mary “In Memoriam” e
Leonardo, meu grande incentivador.*

AGRADECIMENTOS

A Deus. Certamente a única presença em todos os momentos.

Aos meus pais, Leonardo pelo exemplo e Mary pela força. Amo vocês.

À Dê. Uma mulher que sempre esteve presente, uma pessoa incondicional. É um desses “anjos” que aparecem na vida da gente.

Ao professor Wellington, sempre objetivo na orientação e inteligente em todas as observações e contribuições. Agradeço por sua dedicação e apoio.

Aos professores Vicente Nicolau e Saulo Güths do LMPT sempre muito prestativos. Agradeço pelo apoio, discussões, idéias e ajuda nos momentos difíceis.

Ao professor Philippe Gleize pela colaboração e incentivo constantes.

Aos professores Luis Roberto Prudêncio, Janaíde Cavalcante e Malik Cheriaf, agradeço.

Ao Luciano do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica pela paciência.

Aos colegas Manuel “El chileno”, Paulo Henrique, João Marcos, Daniel Vieira, Wilson, “Pablito”, Lucas e ao grupo do GTec pelas discussões e amizade.

À Ligia Maia meus agradecimentos especiais pela compreensão, estímulo constante e amizade. A Mari e Shay pela compreensão e paciência. A Andrea Barriga pelo apoio constante e pela nossa amizade sincera.

À “La Maga” e “Mi Laurita” que vivenciaram esta experiência do meu lado. Agradeço vocês do fundo do meu coração.

A todos aqueles que, de alguma forma se cruzaram no meu caminho e que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao programa da Pós-graduação de engenharia civil da UFSC, por abrir suas portas para a realização deste estudo.

Ao Conselho nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro permitindo a viabilização desta pesquisa.

À grande família BRASIL por apoiar e incentivar minha criatividade e raciocínio, contribuindo para meu crescimento profissional.

E especialmente à “ilha da magia” por ter me acolhido.

A todos ustedes GRACIAS!

RESUMO

Neste trabalho foi produzida uma argamassa translúcida mediante adição de fibras óticas plásticas ou poliméricas (FOP) fabricadas com poliestireno (PS). Foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões (40x40x160cm) e deles extraídas placas com dimensões (10x40x160cm) avaliando-se a vulnerabilidade das fibras frente à ação dos álcalis presentes na matriz de cimento Portland hidratado e a influência em algumas propriedades físico-mecânicas como absorção de água por imersão, resistência à tração na flexão, condutividade térmica e transmitância. A resistência mecânica foi avaliada aos 28, 90 e 120 dias de idade. As placas foram submetidas a envelhecimento acelerado (ciclos de secagem/molhagem, sala com temperatura e umidade controlada, intempérie e imersão parcial em água), durante períodos de 60 e 90 dias, com o objetivo de avaliar a possível degradação das fibras na matriz cimentícia. A transmitância das placas foi avaliada antes e depois da exposição nos ambientes. FOP foram imersas em solução saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e solução de Lawrence por um período de 120 dias e mantidas em estufa e na sala climatizada a temperaturas de 50°C e 23°C, respectivamente. As FOP retiradas das placas translúcidas e das soluções agressivas foram analisadas mediante microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar a textura superficial e espectroscopia no infravermelho (EIV) para avaliar a estrutura do polímero. Os resultados mostraram que a adição de FOP reduziu significativamente a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade das placas. Não foi observada alguma influência por parte das soluções agressivas e dos álcalis presentes na matriz cimentícia na superfície da FOP e sua estrutura.

Palavras-chave: Argamassa. Translúcida. Fibra.

ABSTRACT

In this paper a translucent mortar was produced by adding a plastic optical fiber or polymer (POF) made of polystyrene (PS). Prismatic test bodies were molded with dimensions (40x40x160cm), from them were drawn plates with dimensions (10x40x160cm) assessed the vulnerability of the fibers facing the action of alkalis present in the matrix of hydrated Portland cement and its influence in some physical-mechanical properties as water absorption by immersion, flexural strength, thermal conductivity and transmittance. Mechanical strength was analyzed at 90 and 120 days old. Plates were subjected to accelerated aging (drying/wet cycles, room with controlled temperature and humidity, outdoor and partial immersion in water) for periods of 60 and 90 days in order to evaluate the possible degradation of the fibers in the cement matrix. The translucence of the plates was assessed before and after exposure in the environments. POF were immersed in saturated solution of calcium hydroxide (Ca(OH)_2) and Lawrence solution for a period of 120 days and maintained in an oven and air-conditioned room at temperatures of 50°C and 23°C, respectively. Translucent plates POF extracted and from the aggressive solutions were analyzed by sweep electron microscopy (SEM) and infrared spectroscopy (IR-Spectroscopy) to assess the structure of the polymer. The results showed that the addition of POF reduced significantly flexural strength and modulus of elasticity of the plates. Any influence was observed by aggressive solutions and alkalis present in the cement matrix on the surface of the POF and its structure.

Keywords: Mortar. Translucent. Fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Construção do ano 1540 nos Estados Unidos com adobe reforçado com palha.	42
Figura 2 – Ninho característico do João de barro.....	43
Figura 3 – Curvas Carga - Deflexão dos concretos simples e reforçados com fibras.	45
Figura 4 – Gráfico de tenacidade em função da resistência à flexão de materiais a base de cimento e materiais reforçados com fibras.....	46
Figura 5 – Aspecto da fibra PET em argamassa exposta por 28 (a) e 150 (b) dias ao ambiente de laboratório.....	49
Figura 6 – (a) Fibra PET sem exposição; (b) Vazio anteriormente ocupado pela fibra em amostras de argamassa imersas em água do mar sintética, desintegração provocada aos 28 dias.	50
Figura 7 – Reação responsável pela degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencional, quando expostas ao meio alcalino.....	50
Figura 8 – Aspecto superficial de uma fibra de vidro convencional (tipo E), removida de um compósito de cimento	

Portland após dois meses de envelhecimento acelerado em água a 20°C.	51
Figura 9 – Fibras óticas poliméricas.	53
Figura 10 – Geometria da fibra ótica polimérica.	55
Figura 11 – (a) Feixe de luz se propagando dentro da FOP, (b) Seção de uma FOP.	55
Figura 12 – Feixe de luz incidindo na fronteira entre dos materiais com diferentes índices de refração.	56
Figura 13 – Feixe de luz totalmente refletido.	57
Figura 14 – (a) Condução de luz pontual; (b) Condução de luz perimetral.	58
Figura 15 – Estrutura molecular: (a) PMMA; (b) PS e (c) PC.	58
Figura 16 – Processo de extrusão.	59
Figura 17 – Processo de fabricação da fibra.	60
Figura 18 – Interiores iluminados com FOP.	62
Figura 19 – Paredes feitas com blocos translúcidos - LITRACON.	63
Figura 20 – Placas de argamassa translúcidas produzidas na UFSC. (a) Face iluminada pelo sol; (b) Efeito produzido no	

verso; (c) Face iluminada com luz artificial; (d) Efeito produzido no verso da placa.	64
Figura 21 – Logos: (a) Sem luz; (b) Com luz.	65
Figura 22 – Distribuição e fechamento dos espaços. Banheiros e janelas.	65
Figura 23 – Elementos decorativos de exteriores.....	66
Figura 24 – Portão de uma garagem com concreto translúcido. (a) Vista exterior; (b) vista interior.	66
Figura 25 – Distribuição granulométrica da areia fina.....	72
Figura 26 – Microscópio Eletrônico de varredura (MEV).	74
Figura 27 – Montagem das FOP na câmera do MEV.	74
Figura 28 – Textura superficial da FOP visualizada no MEV. (a) FOP lavada com álcool; (b) FOP lavada com água deionizada.....	75
Figura 29 – Seção transversal da FOP.	75
Figura 30 – Núcleo e revestimento da FOP.	76
Figura 31 – Espessura da camada de revestimento de uma FOP.	76
Figura 32 – Variação da massa das FOP imersas em água deionizada.....	77

Figura 33 – FOP ensaiada a Tração na máquina Instron.	78
Figura 34 – Tensão de tração x deformação específica da FOP.	79
Figura 35 – Espectrômetro utilizado nos ensaios - FTLA2000.	79
Figura 36 – Espectro da FOP sem exposição.	80
Figura 37 – Moldagem dos prismas.....	82
Figura 38 – (a) Corte dos prismas; (b) Distribuição das FOP no interior dos prismas.....	83
Figura 39 – Ciclos de exposição das placas (a): Molhagem - Imersas em água durante 2 dias; (b): Secagem - Mantidas na estufa durante 3 dias.	84
Figura 40 – Placas em exposição no terraço.....	84
Figura 41 – Imersão parcial das placas em água.	85
Figura 42 – Ensaio de tração na flexão na maquina Instron....	86
Figura 43 – FOP na região de ruptura da placa translúcida.....	87
Figura 44 – Princípio do método de medição da resistência térmica.	89
Figura 45 – Montagem para a medição da resistência térmica das placas translúcidas.....	90

Figura 46 – (a) Fonte de alimentação da resistência aquecedora; (b) Sistema de aquisição de sinais.	91
Figura 47 – Luxímetro Minipa – MLM-1333.	92
Figura 48 – (a) Caixa preta para medir a transmitância das placas; (b) Combinações de posição da fonte e o sensor.	93
Figura 49 – FOP imersas em solução de Lawrence e Ca(OH)_2 durante 120 dias: (a) mantidas no laboratório; (b) mantidas na estufa.	95
Figura 50 – Programa experimental para as placas de argamassa.	97
Figura 51 – Programa experimental para as FOP.	97
Figura 52 – Variação da massa em função do tempo das FOP imersas em soluções agressivas após 120 dias.....	100
Figura 53 – Aspecto superficial da FOP mantidas em Ca(OH)_2 a 23°C durante 120 dias.....	101
Figura 54 – Aspecto superficial da FOP mantidas em Ca(OH)_2 a 50°C durante 120 dias.....	101
Figura 55 – Aspecto superficial da FOP mantidas em solução de Lawrence a 23°C durante 120 dias.	101
Figura 56 – Aspecto superficial da FOP mantidas em solução de Lawrence a 50°C durante 120 dias.	101

Figura 57 – Espectros das FOP expostas em Ca(OH)_2 e solução de Lawrence.....	102
Figura 58 – (a) Superfície da FOP retirada da matriz cimentícia; (b) Superfície da FOP sem retirar da matriz.	104
Figura 59 – Fragmentos retirados das placas translúcidas e distribuição das fibras no seu interior.	104
Figura 60 – FOP após exposição por 520 dias em matriz CP II mantida à intempérie.....	105
Figura 61 – FOP após exposição por 360 dias em matriz CP IV mantida à intempérie.....	105
Figura 62 – FOP após exposição por 120 dias em matriz CP VI ARI RS mantida no laboratório.	106
Figura 63 – EDS da cinza volante hidratada.	106
Figura 64 – FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida em imersão parcial em água.....	107
Figura 65 – FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida no terraço.....	107
Figura 66 – Interface colada à superfície da FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida em ciclos de secagem/molhagem.	108
Figura 67 – Interface composta por C-S-H.....	108

Figura 68 – Aspecto superficial da FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida em ciclos de secagem/molhagem.	108
Figura 69 – Absorção de água das placas com adição e sem adição de FOP com 60 dias de idade.....	110
Figura 70 – Absorção de água de 6 placas translúcidas com 60 dias de idade.	110
Figura 71 – Condutividade térmica de 4 placas translúcidas com dimensões (11,5X100X100)mm, com relação à placa sem FOP com λ (W/mK) = 1,64.	111
Figura 72 – Transmitância em função da quantidade de FOP/cm ²	112
Figura 73 – Orientação das FOP no interior da matriz cimentícia e sua influência na transmitância.	113
Figura 74 – Efeito da interação entre os tempos e ambientes de exposição na transmitância.....	113
Figura 75 – (a) Revestimento da FOP descolado do núcleo pelo corte realizado com estilete; (b) Seção transversal deformada de uma FOP em matriz cimentícia cortada com serra.....	115
Figura 76 – Esmagamento do núcleo da FOP produzido pelo corte com tesoura.	115

Figura 77 – Efeito da interação entre os ambientes de exposição e adição de FOP sobre a resistência à tração na flexão ao longo do tempo.	116
Figura 78 – Efeito da interação entre os ambientes de exposição e adição de FOP sobre o módulo de elasticidade ao longo do tempo.	118
Figura 79 – Influência da quantidade de FOP/cm ² na resistência à tração na flexão das placas translúcidas.....	119
Figura 80 – Influência da quantidade de FOP/cm ² na deformação das placas translúcidas.	120
Figura 81 – EIV das FOP sem exposição.	137
Figura 82 – EIV do Poliestireno (PS).	137
Figura 83 – EIV do Polimetilmetacrilato (PMMA).....	138
Figura 84 – EIV das FOP após 520 dias de exposição em matriz cimentícia CP II-Z.	138
Figura 85 – EIV das FOP após 360 dias de exposição em matriz cimentícia CP IV.	139
Figura 86 – EIV das FOP após 120 dias de exposição em matriz cimentícia CP V ARI RS e 90 dias em ciclos de secagem/molhagem.....	139

Figura 87 – EIV das FOP após 120 dias de exposição em matriz cimentícia CP V ARI RS e 90 dias de Imersão Parcial.	140
Figura 88 – EIV das FOP após 120 dias de exposição em matriz cimentícia CP V ARI RS e 90 dias no laboratório.....	140
Figura 89 – EIV das FOP após 90 dias de exposição em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 50°C.....	141
Figura 90 – EIV das FOP após 90 dias de exposição solução de Lawrence a 50°C.	141
Figura 91 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas expostas no Laboratório.	151
Figura 92 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas expostas no Laboratório.	152
Figura 93 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas expostas em ciclos de secagem/molhagem.	153
Figura 94 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas expostas em ciclos de secagem/molhagem.	154
Figura 95 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas expostas no terraço.....	155
Figura 96 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas expostas no terraço.....	156

Figura 97 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas imersas parcialmente em água.....	157
Figura 98 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas imersas parcialmente em água.....	158
Figura 99 – Gráfico tensão x deformação das placas sem exposição e aos 28 dias de idade.	159
Figura 100 – Representação esquemática dos componentes do MEV.	171
Figura 101 – Imagem em MEV da amostra de uma argamassa feita com cimento CP IV: (a) Área de análise (b) Espectro EDS da área 2.....	172
Figura 102 – Esquema de um espectrofotômetro de FT IR...	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de alguns parâmetros correspondentes a FOP de composição de núcleos diferentes.	59
Tabela 2 – Caracterização física do cimento CP V ARI RS. ..	70
Tabela 3 – Caracterização química do cimento CP V ARI RS.	71
Tabela 4 – Características físicas da areia.....	72
Tabela 5 – Características físico-químicas do GLENIUM 51.	73
Tabela 6 – Resultados individuais da resistência à tensão na tração, deformação e módulo de elasticidade das FOP.	78
Tabela 7 – Análise das bandas do espectro obtido infravermelho das FOP sem exposição.	81
Tabela 8 – Distribuição das placas com e sem FOP nos ambientes de exposição.	85
Tabela 9 – Características técnicas do Luxímetro.....	92
Tabela 10 – Características da fonte de luz.....	93
Tabela 11 – Massa seca e úmida das FOP em soluções agressivas após 120 de imersão.....	99
Tabela 12 – Análise das bandas do espectro no infravermelho das FOP mantidas na estufa a 50°C.....	103

Tabela 13 – Transmitância inicial e Relação área de fibras/área total das placas sem exposição.	114
Tabela 14 – Variação da resistência à tração na flexão das placas influenciada pela adição de FOP ao longo do tempo.	117
Tabela 15 – Variação da resistência à tração na flexão das placas com e sem adição de FOP influenciada pelos ambientes de exposição ao longo do tempo.....	117
Tabela 16 – Variação do módulo de elasticidade das placas influenciada pela adição de FOP ao longo do tempo.	118
Tabela 17 – Variação do módulo de elasticidade das placas com e sem adição de FOP influenciada pelos ambientes de exposição ao longo do tempo.	118
Tabela 18 – Valores de análise de variância para os ensaios de resistência a tração na flexão.	120
Tabela 19 – Valores de análise de variância para o módulo de elasticidade.	121
Tabela 20 – Valores de análise de variância para a deformação.	121
Tabela 21 – Valores obtidos da absorção de água por imersão das placas de argamassa com e sem adição de FOP.....	133

Tabela 22 – Teor de absorção de água das placas translúcidas.	133
Tabela 23 – Resistência à tração na flexão e Módulo de elasticidade das placas expostas no Laboratório.	145
Tabela 24 – Resistência à tração na flexão e Módulo de elasticidade das placas expostas em Água/Estufa.	146
Tabela 25 – Resistência à tração na flexão e Módulo de elasticidade das placas expostas à intempérie no terraço.	147
Tabela 26 – Resistência à tração na flexão e Módulo de elasticidade das placas imersas parcialmente em água.	148
Tabela 27 – Medidas em lux das placas expostas no laboratório.	163
Tabela 28 – Medidas em lux das placas expostas em ciclos de secagem/molhagem.	164
Tabela 29 - Medidas em lux das placas expostas no terraço.	165
Tabela 30 - Medidas em lux das placas imersas parcialmente em água.	166
Tabela 31 – Variação da Transmitância das placas no Laboratório e em Água/Estufa.	167
Tabela 32 – Variação da Transmitância das placas no terraço e em imersão parcial.	168

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

CFOP – Com fibra ótica plástica
CRF – Concreto reforçado com fibra
CYTOP – Polímero fluoratado amorfo
EDS – Espectroscopia de raios X por energia dispersiva
EIV – Espectroscopia no infravermelho
FOP – Fibra ótica plástica
HCS – Núcleo de sílica
LABCON – Laboratório de conforto ambiental
LCME – Laboratório central de microscopia eletrônica
LIF – Laboratório de instrumentação e fotônica
LMCC – Laboratório de materiais de construção civil
LMPT – Laboratório de meios porosos e propriedades termo-físicas
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
PC – Policarbonato
PCA – Associação de cimento Portland
PCS – Revestimento plástico e de sílica
PE – Polietileno
PET – Polietileno tereftalato
PMMA – Polimetilmetacrilato
PP – Polipropileno
PS – Poliestireno
PT – Placa translúcida
SFOP – Sem fibra ótica plástica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	35
1. INTRODUÇÃO	35
1.1 Importância.....	36
1.2 Justificativa.....	37
1.3 Objetivos	38
1.3.1 Objetivo Geral	38
1.3.2 Objetivos Específicos	38
1.4 Estrutura do Trabalho.....	38
CAPÍTULO 2	41
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
2.1 Concreto e Argamassas com Fibras	41
2.1.1 Desenvolvimento Histórico.....	41
2.1.2 Materiais Compósitos.....	43
2.1.3 Concreto Reforçado com Fibra	44
2.1.4 Tipos de Fibras Usadas	46
2.1.5 Durabilidade das Fibras.....	49
2.2 Fibra Ótica Polimérica - FOP.....	52
2.2.1 Origem e Evolução das Fibras Óticas Poliméricas	52
2.2.2 Estrutura Básica das Fibras Óticas	54
2.2.3 Princípios de Transmissão de Luz por Fibras Óticas	55
2.2.4 Material que Compõe a Fibra Ótica Polimérica.....	58

2.2.5 Processo de Fabricação da FOP	59
2.2.6 Vantagens das FOP	60
2.2.7 Aplicações da Fibra Ótica Polimérica	61
2.3 Concreto Translúcido.....	62
2.3.1 Aplicações.....	65
CAPÍTULO 3.....	69
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
3.1 Programa Experimental	69
3.2 Materiais Utilizados e Caracterização	69
3.2.1. Cimento.....	70
3.2.2. Areia	71
3.2.3. Aditivos.....	72
3.2.4. Fibras Óticas Poliméricas	73
3.3 Produção das Placas Translúcidas	81
3.4 Ambientes de Exposição das placas Translúcidas.....	83
3.5 Desempenho das Placas Translúcidas	86
3.5.1 Resistência à Tração na Flexão.....	86
3.5.2 Absorção de Água por Imersão	88
3.5.3 Medição da Condutividade Térmica pelo Método Fluximétrico.....	89
3.5.4 Transmitância das Placas de Argamassa	91
3.6 Desempenho das Fibras Óticas Plásticas	94
3.6.1 Exposição das Fibras em Soluções Agressivas	94
3.6.2 Exposição das Fibras em Materiais a Base de Cimento	95

CAPÍTULO 4	99
4. RESULTADOS E ANÁLISES	99
4.1 Avaliação da Exposição das Fibras Óticas Poliméricas em Soluções Agressivas	99
4.1.1 Absorção das FOP em Soluções Agressivas	99
4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	100
4.1.3 Espectroscopia no Infravermelho	102
4.2 Avaliação da Exposição das Fibras Óticas Poliméricas em Materiais a Base de Cimento	103
4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura	104
4.2.2 Espectroscopia no Infravermelho	109
4.3 Avaliação do Desempenho das Placas Translúcidas	109
4.3.1 Absorção de Água por Imersão	109
4.3.2 Condutividade Térmica	111
4.3.3 Transmitância	111
4.3.4 resistência à Tração na Flexão	115
CAPÍTULO 5	123
5. CONCLUSÃO	123
REFERÊNCIAS	125
ANEXO A – Absorção de Água por Imersão	131
ANEXO B – Espectros das Fibras Óticas Poliméricas	135
ANEXO C – Resistência à Tração na Flexão e Módulo de Elasticidade	143
ANEXO D – Gráfico Tensão x Deformação	149

ANEXO E – Transmitância das Placas	161
ANEXO F – Técnicas Experimentais para o Estudo da	
Microestrutura.....	169

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Será possível usar concreto convencional para fabricar paredes translúcidas? Poderíamos identificar o que se encontra do outro lado da parede? Isto significaria poder ver através dos muros! Ou criar pisos pelos quais possa atravessar a luz! Será possível?

A história dos materiais de construção acompanha a própria história do homem, pois este sempre buscou um local de abrigo e segurança imprescindível à sua sobrevivência e um ponto de referência fundamental para o seu relacionamento com o mundo. Para Isaia (2005), a explicação para essa constatação é simples: a natureza forneceu matérias primas abundantes, no estado natural ou transformadas pela manipulação humana. O homem, pela sua inerente capacidade de elaborar relações de causa-efeito, estabeleceu interações entre as necessidades existentes e as possibilidades de aplicação que esses materiais disponibilizaram para solução de seus problemas imediatos.

O aprimoramento das descobertas realizadas pelo homem elevou seu conhecimento em direção ao emprego de materiais mais complexos que deram seus respectivos nomes aos estágios da civilização humana: a idade de pedra com as primeiras ferramentas e armas para caçar, fabricadas com esse material; a idade de bronze na que se descobre a ductilidade e multiplicidade desse material; seguida da idade de ferro na que este substitui o bronze por ser um material mais forte e com mais aplicações.

A evolução dos materiais, inicialmente, se deu a passos lentos. O concreto nasce da necessidade de um material que fosse tão resistente como a pedra e de moldagem fácil como o barro. Surgiu inicialmente a pozolana, que misturada com cal e água, apresentaria um material com características muito semelhantes ao concreto atual.

Através dos anos, o homem se torna cada vez mais exigente, surgindo, deste modo, diversas necessidades que precisam ser resolvidas. Assim, se incorporaram diferentes materiais na matriz cimentícia desenvolvendo novos e diversos produtos com melhores resistências, maior durabilidade e melhor aparência. Materiais que são

usados amplamente em diferentes construções de acordo com o objetivo de cada uma delas, tentando assim suprir as necessidades.

De acordo com Vasconcelos e Isaia (2005), desde os primórdios do uso corrente do concreto em construções, a partir do século XX, o Brasil se notabilizou pela execução de estruturas que se destacaram no cenário mundial, graças a projetistas e executores que caminharam na vanguarda em relação aos demais países. A partir de então, várias obras em concreto colocaram o Brasil na vanguarda mundial das construções em concreto.

Para John e Gleize (2007), o avanço do conhecimento possibilitou, nas últimas décadas, uma grande sofisticação da ciência de materiais hoje empregada para o aperfeiçoamento e desenvolvimento de materiais otimizados para cumprir as funções desejadas com enorme eficiência. O desenvolvimento futuro dos materiais de construção será, certamente, resultado da aplicação intensiva dos conhecimentos da ciência de materiais e seus conceitos.

1.1 Importância

Na atualidade, um dos grandes conflitos que se apresentam na hora de planejar uma estrutura é o tema da resistência versus iluminação. Levar na prática os dois conceitos dentro de um mesmo projeto é um tema que hoje é possível resolver se levarem em conta as novas propostas de concreto translúcido que se desenvolvem no mundo.

O Arquiteto Húngaro Áron Losonczy, tem sido o artífice do novo concreto translúcido denominado “Litracon”. Trata-se de um material inovador que, segundo o autor, uma parede feita com blocos “Litracon” tem a resistência do concreto convencional e graças ao material adicionado, possibilita visualizar as silhuetas do espaço exterior.

Sempre foi um anseio das mentes mais criativas a criação de um concreto que pudesse ser atravessado pela luz. Para Repette (2005) o concreto Litracon é um grande e inegável avanço. Hoje, no Brasil, se está pesquisando sobre o concreto “Litracon”.

Consecutivamente, em outras partes do mundo, pesquisadores trabalham com estas noções de transparência no material de construção e fazem suas respectivas propostas de mistura de materiais que permitiriam a passagem da luz através das estruturas, sem diminuir o volume e resistência do material.

1.2 Justificativa

De acordo com Metha (2008), fibras de vidro comuns não podem ser utilizadas em argamassas ou concretos de cimento Portland, por causa do ataque químico pelos álcalis do cimento. A resistência aos álcalis do cimento é obtida pela incorporação do óxido de zircônia no seu processo de fabricação, mas mesmo assim, as fibras apresentam uma degradação gradual com o passar do tempo, como a maioria das fibras naturais e alguns polímeros sintéticos que apresentam problemas de durabilidade.

A pesquisa em desenvolvimento visa a incorporação de fibras óticas poliméricas (FOP) na matriz cimentícia. Estudos realizados anteriormente, demonstram que o meio alcalino afeta a durabilidade e o bom desempenho de alguns tipos de fibras plásticas usadas como reforço e, portanto, do material compósito. Para Hannant (1994) as fibras de polietileno (PE) e polipropileno (PP) têm uma excelente resistência aos álcalis do cimento. Alguns autores como Wang et al. (1987) e Jelidi (1991) afirmam que as fibras de poliéster, em contato com meio cimentício e básico, sofrem degradação, diminuindo sua capacidade de reforço nos compósitos. No entanto, Jakel, citado por Wang et al. (1987), alegou sucesso no uso de fibras de poliéster no melhoramento dos produtos à base de cimento Portland. Já, a ACI-544.1R (1997) conclui que fibras de poliéster não apresentam desempenho para reforçar materiais com matriz cimentícia, por causa da sua degradação. Fatos como este, reforçam a necessidade de serem realizados estudos criteriosos sobre a durabilidade de fibras óticas plásticas em matrizes de cimento Portland.

Em teoria, um concreto com características de transparência pode ser feito se os elementos usados possuem esta particularidade. Vidro, plástico ou resina, entre outros materiais, podem ser uma das opções de adição, que junto com algum tipo de aglomerante permitam imitar as propriedades mecânicas do concreto convencional.

A literatura disponível sobre a produção e o desempenho de concreto translúcido obtido por inclusão de fibra ótica é bastante escassa, já que esta é uma proposta que se encontra em processo de pesquisa. Existem, no entanto, aportes literários individuais sobre o concreto, adições e materiais com características de transparência que podem dar uma orientação para o desenvolvimento deste projeto.

Então, é possível ver através dos muros? Não impecavelmente ou com total nitidez, mas sim é possível a identificação de sombras ou

silhuetas do que se encontre no outro lado, sempre e quando exista uma intensidade diferente de luz sobre cada face da parede.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver argamassa translúcida com adição de fibra ótica polimérica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito das fibras óticas plásticas em algumas propriedades físico-mecânicas das placas de argamassa:
 - Resistência à tração na flexão,
 - Absorção de água,
 - Condutividade térmica,
 - Transmitância,
 - Comportamento das fibras expostas em ambientes agressivos.

1.4 Estrutura do Trabalho

Objetivando uma melhor compreensão do leitor o presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos:

No **Capítulo 1** apresenta-se a proposta da pesquisa desenvolvida nesta dissertação. Por conseguinte, objetivos são propostos delimitando o tema.

No **Capítulo 2** apresenta-se uma revisão sobre o uso de fibras adicionadas em concreto e argamassa. Faz uma revisão bibliográfica sobre fibras óticas e sobre o concreto translúcido.

O programa experimental é apresentado no **Capítulo 3**, que descreve e caracteriza os materiais, avalia as fibras imersas em ambientes agressivos e na matriz de cimento Portland hidratado além

dos ensaios de desempenho e comportamento das placas de argamassa translúcida.

No **Capítulo 4** estão apresentados os resultados e as análises das fibras óticas plásticas e das placas translúcidas.

Por fim, no **Capítulo 5** se apresentam as conclusões, seguidas de uma análise crítica do desempenho e comportamento da peças de argamassa translúcida.

Posteriormente, as Referências Bibliográficas e os Anexos são registrados.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto e Argamassas com Fibras

O reforço de argamassas e concretos de cimento Portland com fibras é uma maneira bastante eficiente de reduzir a fragilidade na ruptura destes materiais, aumentar a durabilidade e conferir propriedades mecânicas não encontradas nas argamassas e concretos convencionais, relacionadas à capacidade de deformação e absorção de energia.

2.1.1 Desenvolvimento Histórico

Quando foi, pela primeira vez, usado o concreto de reforço com fibras nos materiais de construção? De acordo com o Exod 5:6, os egípcios usavam a palha, para reforçar tijolos de barro. Há evidências de que as fibras de asbesto foram usadas para reforçar postes de argila há cerca de 5000 anos (MEHTA, 2008).

De acordo com a ACI 544.1R (1996), desde os tempos antigos, as fibras têm sido utilizadas para reforçar materiais frágeis, existindo relatos de que palhas e pêlos de cavalo foram utilizados para reforçar tijolos de adobe e alvenarias de argamassa e gesso. Uma casa construída por volta do ano 1540, acredita-se ser a casa mais antiga dos Estados Unidos, foi erguida com tijolos de adobe reforçado com palha (figura 1). Em tempos mais recentes, o uso comercial em grande escala de fibras de amianto em uma matriz de cimento começou com a invenção do processo Hatschek¹ em 1898. Hoje, produtos de construção fabricados com cimento amianto são amplamente utilizados em todo o mundo. No entanto, principalmente devido aos perigos de saúde associados com fibras de amianto, os tipos de fibras suplentes foram introduzidos nos anos 1960 e 1970.

¹ processo de mistura de fibras de amianto com cimento na produção de amianto-cimento (AC).



Figura 1 – Construção do ano 1540 nos Estados Unidos com adobe reforçado com palha.

Rodrigues, 2009.

Nos tempos modernos, uma vasta gama de materiais de engenharia (incluindo cerâmicas, plásticos, cimento e produtos de gesso), incorpora fibras para aumentar as propriedades de compósitos. Uma melhora na resistência à tração e à flexão, melhorias na resistência ao impacto e dureza, o controle de fissuras e melhoras na durabilidade são os principais objetivos da engenharia moderna, no intuito de modificar as propriedades do concreto pela inclusão de fibras.

Em 1910 estudos experimentais e patentes envolvem a utilização de fibras descontínuas de aço como reforço - tais como pregos, segmentos de arame e pedaços de metal - para melhorar as propriedades do concreto. Durante o início dos anos 1960 nos Estados Unidos, a primeira grande investigação foi feita para avaliar o potencial das fibras de aço como reforço para o concreto. Desde então, surgiram uma quantidade substancial de pesquisas, desenvolvimentos e aplicações industriais da fibra de aço no concreto armado.

A primeira tentativa de usar fibra de vidro como reforço no concreto foi da URSS em 1950. Foi rapidamente estabelecido que as fibras de vidro comuns Tipo - E, são atacadas e posteriormente destruídas pelos álcalis presentes na matriz cimentícia. Pesquisas foram direcionadas na produção de fibras de vidro álcali-resistente contendo zircônio.

As tentativas iniciais de utilização de fibras sintéticas (nylon, polipropileno), não foram tão bem sucedidas como as de vidro ou fibras de aço. No entanto, para uma melhor compreensão dos conceitos de reforço com fibra, novos métodos de fabricação e novos tipos de fibras orgânicas se produziram, levando aos pesquisadores a concluir que ambas fibras, sintéticas e naturais, servem como reforço no concreto.

De acordo com Rodrigues (2009), o grande desenvolvimento do concreto reforçado com fibras (CRF) se deu após a Primeira Guerra

Mundial (de 1914 a 1918), através da procura, por parte das instituições militares, de um material que absorvesse os impactos das explosões com baixa destruição do mesmo. Do meio militar para o meio civil foi um pequeno passo, sendo os primeiros estudos sobre materiais compósitos a base de cimento desenvolvidos nos anos 50 e 60, tratando dos concretos reforçados com fibras de aço (CRFA) (LOPES, 2005).

Desde então o mercado vem oferecendo uma grande variedade de fibras que podem ser utilizadas como reforço de matrizes a base de cimento. Dentre elas incluem-se as fibras de aço, de vidro, de carbono e kevlar, fibras de polipropileno, náilon, as fibras vegetais (sisal, juta, celulose) e as fibras minerais. Esses tipos de fibras variam consideravelmente em propriedades, eficiência e custo (LOPES, 2005).

Na natureza não é muito diferente, pois os animais também sabem aproveitar as fibras. De acordo com Mehta (2008), o João-de-barro é um passarinho que faz seu ninho em forma de forno misturando palha e barro úmido, como se apresenta na figura 2.



Figura 2 – Ninho característico do João de barro.

<http://img.blogs.abril.com.br/1/sodeusnaodecepciona/imagens/rr.jpg>

2.1.2 Materiais Compósitos

Os primeiros materiais compósitos foram desenvolvidos pela natureza. A madeira é um exemplo de compósito, pois é constituída por fibras de celulose que são envolvidas por resinas. Os ossos também são exemplos de compósitos, pois são formados por cálcio e fibras de colágeno.

Já o primeiro material compósito produzido pelo homem foi o adobe, feito com barro e palha (AGOPYAN, 1993).

Um material compósito, segundo Budinski (1996), é a combinação de dois ou mais materiais que tem propriedades que os materiais componentes não têm por si próprios.

Os materiais compósitos são caracterizados por duas fases: fase matriz e fase reforço.

- A fase matriz geralmente constitui a maior parte do compósito, tendo as funções de envolver a fase de reforço, propiciar estabilidade e distribuir os esforços atuantes para as fibras. As matrizes podem ser poliméricas, metálicas, cerâmicas ou minerais. As matrizes minerais podem ser obtidas com argamassa de cimento, gesso ou de argila.
- A função da fase reforço é aumentar à resistência a tração e flexão do compósito, obtidas pelo uso de fibras, lâminas ou partículas.

Para Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentícia podem em geral ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é tração indireta, flexão e cisalhamento, e também melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis.

Talvez o material compósito mais difundido seja o concreto armado. Ele possui alta resistência à compressão, porém baixa resistência à tração. A armadura em aço possibilita alta resistência à tração. Aço e concreto, juntando o que cada constituinte tem a oferecer de melhor a união destes materiais proporciona ao concreto armado uma melhora nas suas propriedades mecânicas.

2.1.3 Concreto Reforçado com Fibra

O termo “fiber-Reinforced concrete – FRC” Concreto Reforçado com Fibra é definido pela ACI 116R, como o concreto que contém fibras dispersas e orientadas aleatoriamente.

Para Mehta (2008), o concreto contendo um cimento hidráulico, água, agregados miúdos ou graúdos e fibras discretas descontínuas é denominado concreto reforçado com fibras. A figura 3 apresenta curvas

Carga vs Deformação típica para o concreto convencional e para o concreto reforçado com fibras.

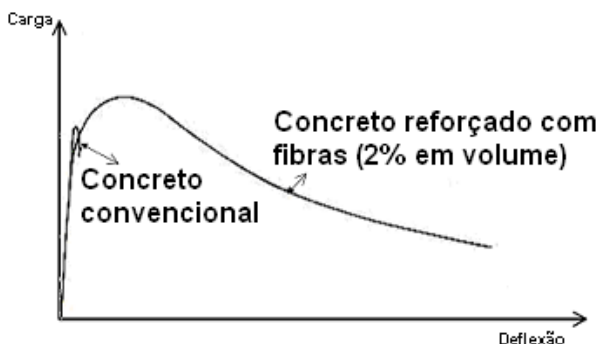


Figura 3 – Curvas Carga - Deflexão dos concretos simples e reforçados com fibras.
Metha (2008).

De acordo com a terminologia adotada pelo Instituto Americano do Concreto, o concreto reforçado com fibra se classifica em quatro categorias, que dependem do tipo de fibra adicionada:

- SFRC: Concreto reforçado com fibra de aço;
- GFRC: Concreto reforçado com fibra de vidro;
- SNFRC: Concreto reforçado com fibras sintéticas, incluindo fibras de carbono;
- NFRC: Concreto reforçado com fibra Natural.

O concreto convencional rompe repentinamente, quando a deformação correspondente à resistência à flexão última for superada; por outro lado, o concreto reforçado com fibras continua a resistir a cargas consideráveis (dependendo do tipo de fibra), mesmo com deformações bastante superiores à deformação de fratura do concreto convencional.

De acordo com Bentur et al. (1990), as fibras são adicionadas ao concreto para promover, após a fissuração, as principais funções: aumentar a resistência do compósito superando a resistência da matriz, garantindo um meio de transferência de tensões e cargas ao longo das fissuras e, a mais importante, aumentar a tenacidade do compósito garantindo um mecanismo de absorção de energia que está relacionado

com o processo de descolamento e arrancamento das fibras entrelaçadas ao longo da fissura.

De acordo com Segre (1995) o concreto é considerado um material de baixo custo e de fácil preparo para uso em construções. No entanto, também é considerado um material frágil e com resistência à tração muito baixa. Essa deficiência pode ser superada combinando-se o concreto com uma armadura metálica e/ou fibras de pequeno diâmetro (vidro, aço ou materiais sintéticos), como mostra a figura 4.

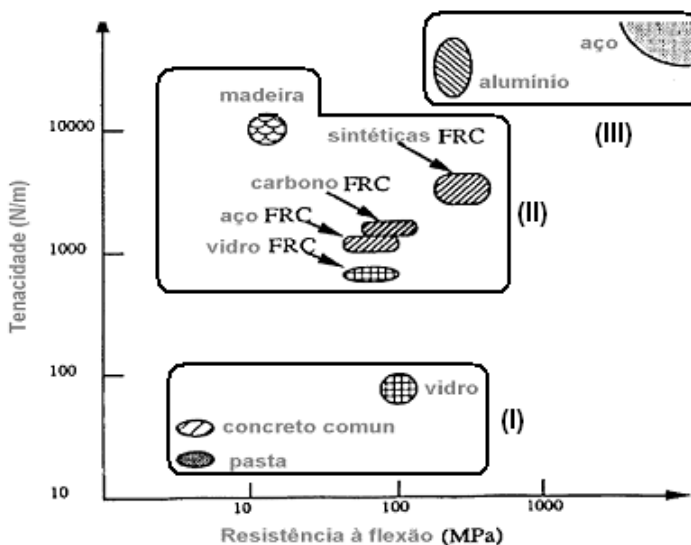


Figura 4 – Gráfico de tenacidade em função da resistência à flexão de materiais a base de cimento e materiais reforçados com fibras.

Segre, 1995.

As fibras são capazes de obstruir a propagação de microfissuras, retardando, portanto, o início das fissuras de tração, proporcionando assim o aumento nas deformações de tração na ruptura do concreto, Newman (2003).

2.1.4 Tipos de Fibras Usadas

Diversos tipos de fibras estão sendo utilizados como reforço em materiais de construção. As características de comportamento de cada

uma delas, as propriedades químicas, físicas e mecânicas, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação. Portanto, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito, como um todo, é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante.

De acordo com Taylor (1994) as fibras metálicas mais comuns são as de aço. O código ACI 544.1R (1996) define as fibras de aço para reforço do concreto como sendo, comprimentos discretos de aço tendo uma relação de aspecto (relação entre comprimento e o diâmetro da seção transversal) entre 20 e 100, com várias formas de seção transversal, e que são suficientemente pequenas para serem dispersas randomicamente e misturadas no concreto fresco por procedimentos usuais. O intuito da utilização deste tipo de fibra é aumentar a tenacidade, resistência à flexão, resistência ao impacto e fadiga e o controle da fissuração do compósito. Hannant (1994) complementa que há uma grande variedade de formas e comprimentos, dependendo do processo de manufatura.

Embora as fibras de vidro sejam confeccionadas com um material frágil – o vidro – elas possuem propriedades satisfatórias para o emprego na construção civil, tais como: baixo coeficiente de dilatação térmica, resistência à tração, retenção das propriedades mecânicas a altas temperaturas, grande alongamento na ruptura, facilidade de processamento, baixo custo se comparadas às outras fibras dúcteis, além de não serem passíveis de inalação, o que representa uma grande vantagem se comparado ao amianto. (PERUZZI, 2002)

As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, isto é, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais depende das propriedades do vidro, do tamanho do furo por onde são extrusados e da velocidade de extrusão, mas geralmente são da ordem de 10µm (TAYLOR 1994).

As fibras de carbono são materiais baseados na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza dos mesmos. Possuem uma alta resistência à tração e o módulo de elasticidade elevado, características que tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras, caso contrário estas resistências não serão

mobilizadas e as fibras serão arrancadas com cargas menores (TAYLOR, 1994).

As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana de açúcar (HANNANT 1994). As fibras vegetais são fibras de baixo módulo de elasticidade elevada resistência à tração. Seu emprego como reforço proporciona às matrizes cimentícias maior resistência ao impacto, causada por maior absorção de energia, possibilidade de trabalho no estágio pós-fissurado e um aumento na capacidade de isolamento termo-acústico (AGOPYAN; SAVASTANO Jr., 1997).

Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes denominações e comportamentos, dando origem a diversos tipos de fibras.

As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico chamado termoplástico. Os polímeros termoplásticos consistem em uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas. Todas as cadeias são separadas e podem deslizar umas sobre as outras. Esta característica, segundo Taylor (1994), explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno que concede substancial aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é incorporada. O módulo de elasticidade é menor do que qualquer outra fibra comumente utilizada, aproximadamente 8GPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis.

A fibra de polietileno, de peso molecular normal, tem um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentícia e são altamente resistentes aos álcalis. Contudo, polietileno com alta densidade tem sido desenvolvido para aumentar o módulo e a aderência com a matriz. Como não sofrem variação volumétrica na presença de água, a durabilidade dos produtos é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência quando comparadas com as fibras de polipropileno (HANNANT, 1994).

A aparência das fibras de poliéster é similar às fibras de polipropileno, mas são mais densas, mais rígidas e mais resistentes. Elas podem ser usadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno, mas onde a melhora na performance justifica o seu maior custo (TAYLOR, 1994). Um dos poliéster mais conhecidos é o polietileno tereftalato (PET), atualmente utilizado como material de constituição de garrafas plásticas.

2.1.5 Durabilidade das Fibras

Algumas pesquisas importantes sobre durabilidade das fibras (poliméricas, vidro, vegetais e aço), nos compósitos a base de cimento comentam-se a seguir.

Segundo Jelidi (1991), o mecanismo de degradação química da fibra de PET consiste em uma reação de polimerização que quebra parcialmente ou totalmente a cadeia do polímero em dois grupos: o grupo do anel aromático e o grupo do éster alifático. São estes grupos nos quais vão se fixar respectivamente os íons álcalis e os íons hidroxilas, resultando em dois produtos: tereftalato de sódio e/ou potássio e/ou cálcio e etileno glicol.

A degradação das fibras PET foi notada por Johnston (1994). Segundo o autor, a durabilidade de fibras sintéticas, como as de poliéster, em meio alcalino, é questionável: alguns tipos de fibras, como as PET, mostram deterioração, definida como a perda rápida de resistência da fibra no cimento, devido a hidrólise e a dissolução em meio alcalino.

Segundo Betioli (2003), apesar de não ter sido detectada degradação apreciável das fibras imersas nas soluções de Lawrence e de hidróxido de cálcio, a microscopia eletrônica de varredura revelou que as fibras sofreram degradação intensa no interior dos corpos-de-prova de argamassa. A figura 5 mostra o aspecto superficial das fibras PET que permaneceram em matriz cimentícia por até 150 dias.

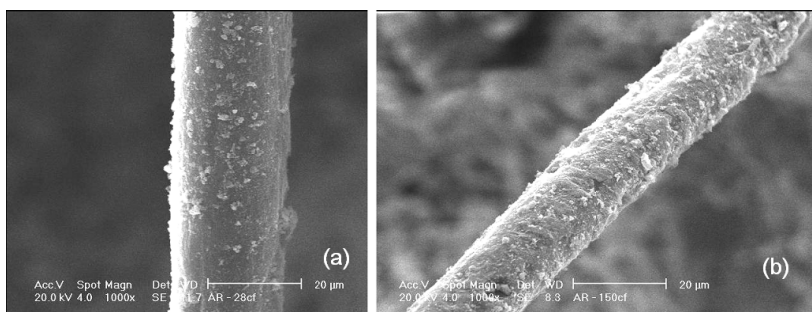


Figura 5 – Aspecto da fibra PET em argamassa exposta por 28 (a) e 150 (b) dias ao ambiente de laboratório.

Betioli, 2003.

A figura 6b apresentada por Betioli (2003) mostra um vazio anteriormente ocupado pela fibra em amostras de argamassa que

permaneceram imersas em água do mar sintética por 28 dias. A figura 6a representa a fibra sem exposição.

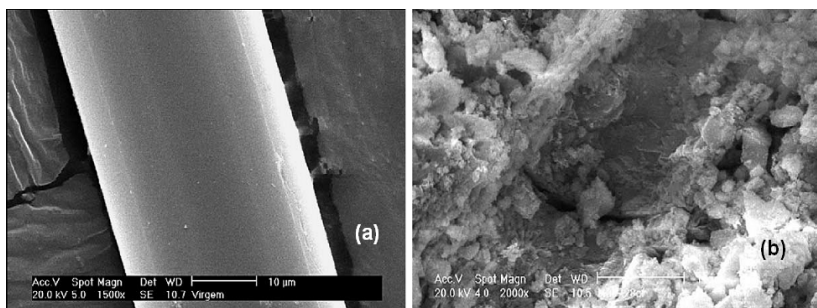


Figura 6 – (a) Fibra PET sem exposição; (b) Vazio anteriormente ocupado pela fibra em amostras de argamassa imersas em água do mar sintética, desintegração provocada aos 28 dias.
Betoli, 2003.

Taylor (1994) afirma que as fibras de vidro produzidas a partir do vidro tipo E, cerca de 99%, são atacadas pelos álcalis presentes nos materiais a base de cimento portland.

Segundo Bentur e Mindess (1990), a fibra de vidro convencional, quando exposta ao meio alcalino, sofre um rápido processo de deterioração de suas propriedades mecânicas com perda de resistência, perda de massa e redução do diâmetro dos filamentos.

A deterioração das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencionais pode ser atribuída à quebra das ligações Si – O – Si na cadeia do vidro pelos íons OH^- que estão concentrados na solução alcalina dos poros. A figura 7 apresenta a reação responsável pela degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencionais, quando expostas ao meio alcalino.

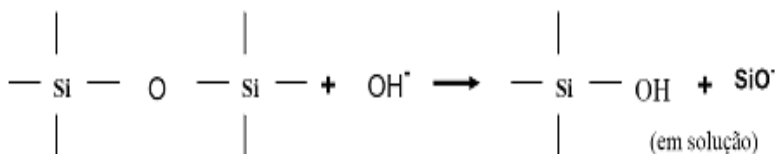


Figura 7 – Reação responsável pela degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencional, quando expostas ao meio alcalino.
Bentur e Mindess, 1990.

A quebra das ligações Si – O – Si leva à danificação da superfície do vidro (cavidades pronunciadas, por exemplo) e o produto da reação de corrosão pode se dissolver ou se acumular na superfície do vidro (BENTUR e MINDESS, 1990). Isso pode ser visto na figura 8, que mostra a fibra de vidro convencional (tipo E) removida de um compósito de cimento Portland após dois meses de envelhecimento acelerado em água a 20°C.

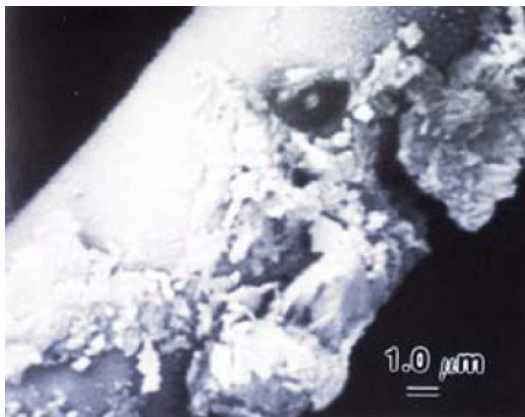


Figura 8 – Aspecto superficial de uma fibra de vidro convencional (tipo E), removida de um compósito de cimento Portland após dois meses de envelhecimento acelerado em água a 20°C.

Bentur e Mindess, 1990.

Diante dessa intensa degradação da fibra de vidro convencional, percebeu-se que era necessário desenvolver uma fibra de vidro adequada ao uso no meio alcalino. Bentur e Mindess (1990) citam que Majundar baseou-se em observações de que as fibras produzidas a partir de composições em sistemas de Na_2O – SiO_2 – ZrO_2 são quimicamente mais estáveis em soluções alcalinas.

As ligações Zr – O, em contraste com a ligação Si – O, são levemente atacadas pelos íons $(\text{OH})^-$ e, então, a incorporação do ZrO_2 , como parte da cadeia, proporciona estabilidade à estrutura do vidro no meio alcalino, isto é, reduz consideravelmente a quebra das ligações. Isso pode dever-se à melhoria na estabilidade de todas as ligações do vidro quando o ZrO_2 está presente ou à formação de uma camada protetora de ZrO_2^- quando algum SiO_2 é quebrado ou extraído. A camada rica em ZrO_2^- permanece no vidro e pode servir como uma

barreira de difusão para reduzir ainda mais a intensidade do ataque (BENTUR e MINDESS, 1990).

A decomposição da fibra vegetal ocorre quando os constituintes da fibra, principalmente a lignina e a hemicelulose presentes na lamela intercelular, são decompostos pela ação do elevado pH da água do poro da pasta de cimento. A decomposição desses produtos conduz à redução na capacidade de reforço da fibra, quebra a aderência com a matriz e torna a fibra um material inerte dentro do compósito. Dessa forma, com a perda de aderência na interface com a matriz, a fibra deixa de funcionar como reforço, passando a ser um material de enchimento, com o agravante de ser higroscópico e putrescível (AGOPYAN, 1991).

A durabilidade do compósito com fibras vegetais, por sua vez, pode ser analisada por meio de ensaios que levem em consideração o envelhecimento natural ou acelerado do material, que podem apresentar resultados bastante diversos, dependendo das condições adotadas (SAVASTANO 2002). Por meio de 120 ciclos de umedecimento e secagem acelerados, a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras de celulose, constataram a redução da tenacidade dos compósitos, provavelmente pela "petrificação" das fibras. Sabe-se também que a alternância entre molhagem e secagem é favorável à degradação e posterior lixiviação da lignina presente na estrutura das fibras vegetais, o que pode reduzir ainda mais a atuação dessas fibras como reforço no interior da matriz (Soroushian et al. apud Savastano, 2002).

As fibras de aço também são vulneráveis, pois de acordo com Taylor (1994), dependendo do meio onde estão inseridas as fibras, podem apresentar problemas relacionados à corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel.

Não foram encontrados estudos publicados sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas ou concretos translúcidos produzidos com fibras óticas de vidro ou poliméricas.

2.2 Fibra Ótica Polimérica - FOP

2.2.1 Origem e Evolução das Fibras Óticas Poliméricas

Zubia (2001) relata a história e o desenvolvimento da fibra ótica plástica que se resume a seguir.

As ondas de luz são uma forma de energia eletromagnética e a idéia de transmitir informação por meio de luz tem mais de um século de antiguidade. A primeira tentativa de utilizar a luz como suporte de transmissão foi realizada por Alexander Graham Bell, no ano 1880. Utilizou um feixe de luz para levar informação, mas se evidenciou, naquela época, que a transmissão das ondas de luz pela atmosfera não é prática já que o vapor de água, oxigênio e partículas no ar absorviam e atenuavam os sinais nas frequências de luz. A idéia foi abandonada porque não se conseguiu fabricar um protótipo; no entanto, os princípios básicos encontrariam aplicações práticas quase um século depois, nas fitas magnéticas e computadores.

Foi no início da década dos anos 60 que as fibras óticas poliméricas foram inicialmente desenvolvidas pela empresa DuPont. As primeiras fibras eram feitas de poliestireno (PS) e acrílicos, apresentando perdas elevadas - na ordem de 500-1.000dB/km - e foram usadas principalmente para guias de luz em aplicações de iluminação de curta distância.



Figura 9 – Fibras óticas poliméricas.

Em 1968, a DuPont apresentou os primeiros resultados das fibras óticas fabricadas a base de polimetilmetacrilato (PMMA), com perdas de 300dB/km. As atenuações observadas até aquela época nas fibras de vidro, não se deviam a mecanismos intrínsecos e sim a impurezas originadas no processo de fabricação. A partir disso começaram a se produzir eventos que dariam como resultado final a implantação e uso cada vez maior da fibra ótica como alternativa aos cabos de cobre.

No ano 1978 a DuPont vende a patente da FOP para a empresa Mitsubishi Rayon (MR) do Japão. No final dos anos 70 e princípios dos anos 80, o avanço tecnológico na fabricação de cabos ópticos e o desenvolvimento de fontes de luz e detectores, abriram a porta ao

desenvolvimento de sistemas de comunicação de fibra óptica de alta qualidade, alta capacidade e eficiência. A empresa NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) apresenta uma fibra SI-FOP deuterada, fabricada com PMMA de baixa atenuação – 20dB/km.

O Professor Koike e colegas da Universidade de Keio no Japão, desenvolveram um processo para a fabricação POF (GI-POF), utilizando PMMA, em 1990. Koike e seus colegas apresentaram uma largura de banda de 3GHz/km com perdas de 150dB/km. O desenvolvimento de Koike resolveu o problema de largura de banda da etapa de índice PMMA POF mas as perdas foram ainda 150dB/km em 650nm.

Em 1996 no Japão, Koike e a universidade de Keio fabricaram a primeira fibra fluoratada SI-POF com atenuações de 0,3dB/km. No final da década dos noventa as fibras com núcleo fluoratado GI-POF conseguem transmitir 7Gb/s ao redor de 80m. O próximo grande desenvolvimento foi a divulgação simultânea em 2001 de um polímero de fibra ótica micro-estruturada (Holey fibra) por grupos na Austrália e na Coreia.

O que aconteceu nas últimas décadas com as fibras óticas de sílica, ocorre hoje com as fibras óticas poliméricas. No início as FOP foram relegadas a um segundo plano nas aplicações comerciais direcionadas às telecomunicações.

Segundo Martins (2007) do laboratório (LIF) da UFRJ, recentemente tem sido desenvolvidas no Japão FOP multimodo de índice de refração gradual dopadas com flúor (FOP perfluoretadas), que apresentam uma atenuação ótica mínima de 0,12 dB/km, que pode ser comparado com o limite teórico de 0,14 dB/km das fibras de sílica.

2.2.2 Estrutura Básica das Fibras Óticas

A estrutura básica das fibras óticas é explicada por Sterling (2004). Uma fibra ótica, como seu nome o indica, é um condutor ótico filiforme, extremamente delgado, através do qual se propaga a luz. Na sua estrutura mais simples, a FOP está constituída por dois cilindros concêntricos: núcleo e revestimento (figura 10).

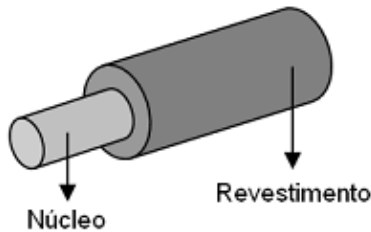


Figura 10 – Geometria da fibra ótica polimérica.

O núcleo é o caminho real de propagação da luz com um índice de refração diferente do revestimento, feito com um polímero de uma elevadíssima pureza, objetivando uma atenuação mínima.

O cilindro exterior cumpre uma função de revestimento e é chamado como tal, que envolve e protege o núcleo e controla e confina a luz para evitar que se refrate, garantindo assim uma propagação da luz ao longo do seu comprimento.

2.2.3 Princípios de Transmissão de Luz por Fibras Óticas

O princípio de transmissão de luz é explicado por Downing (2005) e apresentado a seguir.

A propagação se realiza quando um feixe de luz ingressa ao núcleo da fibra ótica e dentro dele se produzem sucessivas reflexões na superfície de separação Núcleo – Revestimento (figura 11a), denominado princípio de reflexão total interna, um fenômeno relacionado com a refração.

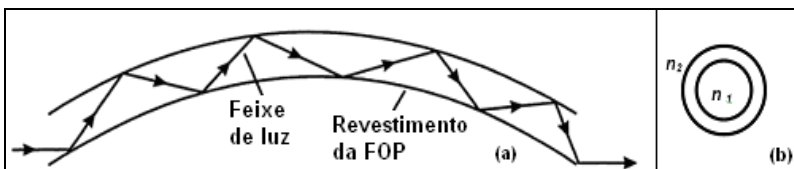


Figura 11 – (a) Feixe de luz se propagando dentro da FOP, (b) Seção de uma FOP.

Cada fio de fibra ótica se compõe de um núcleo central de alto índice de refração, envolvido por uma lâmina de material similar com um índice de refração menor ($n_1 > n_2$), (figura 11b). Quando a luz

chega a uma superfície que limita com um índice de refração menor, se reflete em grande parte. Quanto maior for a diferença entre os índices maior é o ângulo de incidência, então se fala de reflexão total interna, sendo esta a condição mais importante para que a fibra ótica possa confinar a luz no núcleo e guiar o feixe.

O princípio de transmissão de luz por fibras óticas pode ser explicado pela lei de Snell. Em 1621, Willerbrod Snell usou as propriedades de vários materiais transparentes para descrever matematicamente a refração. Ele observou que quando um feixe incide na fronteira entre os materiais com diferentes índices de refração (n_1 e n_2), o feixe incidente será refratado com distinto ângulo (figura 12).

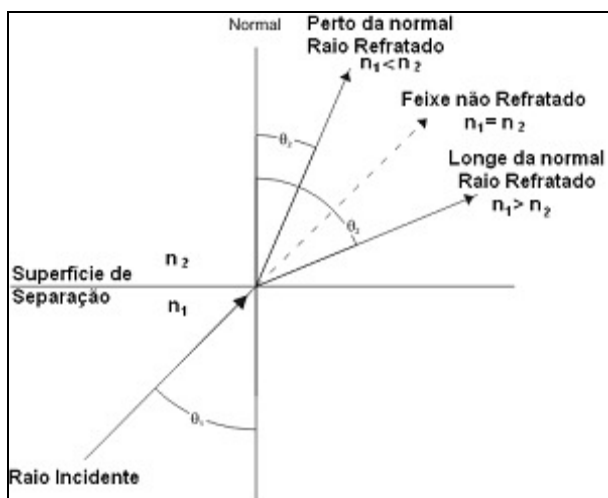


Figura 12 – Feixe de luz incidindo na fronteira entre dos materiais com diferentes índices de refração.

A relação que determina a lei de Snell é: $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$, onde n_1 é o índice de refração do material 1, n_2 é o índice de refração do material 2, θ_1 é o ângulo do feixe incidente (medido desde a normal até a interface) e θ_2 é o ângulo do feixe refratado.

Na fronteira, o feixe incidente se refrata na normal ou longe dela, dependendo se n_1 é menor ou maior do que n_2 . Isso implica que se um feixe ingressa de um material menos denso (índice refrativo mais baixo) a outro mais denso (índice refrativo mais alto) ($n_1 < n_2$), o feixe se refrata com um ângulo menor com respeito à normal. No caso contrário, quando um feixe incide de um material mais denso a outro menos denso, o feixe se refrata com um ângulo maior com respeito à normal.

Considerando que os feixes se afastam da normal quando entram num material menos denso, o ângulo de incidência, denominado ângulo crítico, resulta quando o feixe refratado faz um ângulo de 90° com a normal, (superfície de separação entre ambos materiais). Se o ângulo de incidência se faz maior do que o ângulo crítico, os feixes de luz serão totalmente refletidos (figura 13).

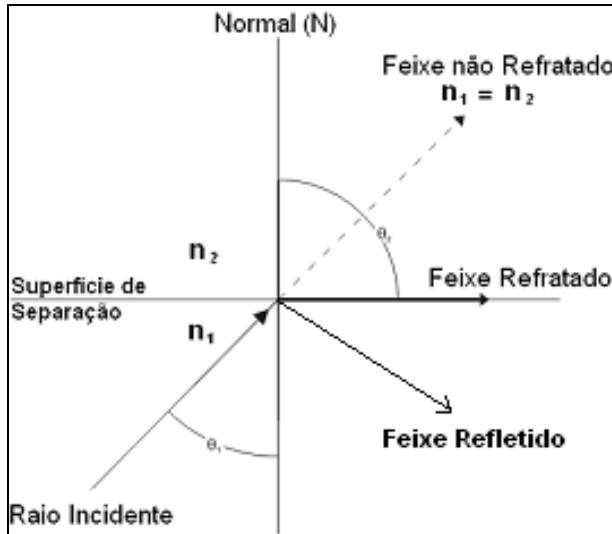


Figura 13 – Feixe de luz totalmente refletido.

Por Snell:

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1;$$

Se $\theta_2 = 90^\circ$

$\theta_1 = \theta_c = \text{ângulo crítico.}$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Então para $\theta_1 > \theta_c \Rightarrow$ Reflexão Total Interna

Basicamente o processo de condução de luz pelos fios de fibra óptica pode se dar de duas maneiras: pontual e perimetral, como apresentado na figura 14.

No sistema de condução pontual (figura 14a), a luz é levada de uma extremidade a outra, apresentando a menor perda possível neste

percurso. Assim, com uma única fonte de iluminação, diversos pontos podem ser iluminados.

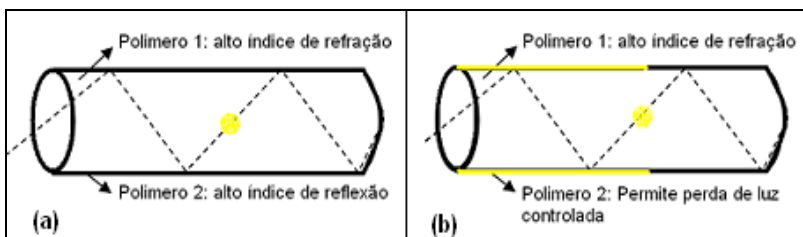


Figura 14 – (a) Condução de luz pontual; (b) Condução de luz perimetral.

Já no sistema de condução perimetral (figura 14b), a camada externa da fibra permite uma perda de luz controlada por sua lateral, criando um efeito de iluminação ao longo da mesma.

2.2.4 Material que Compõe a Fibra Ótica Polimérica

De acordo com Zubia (2001), a matéria-prima das FOP são os polímeros, que se constituem de materiais com longas cadeias moleculares de natureza orgânica. Geralmente o núcleo é fabricado com materiais como polimetilmetacrilato (PMMA), poliestireno (PS), policarbonato (PC), polímeros fluoratados (PF) e deuterados (PD). Já o revestimento é feito com polímeros de baixo índice de refração. A figura 15 apresenta a estrutura molecular do PMMA, PS e PC.

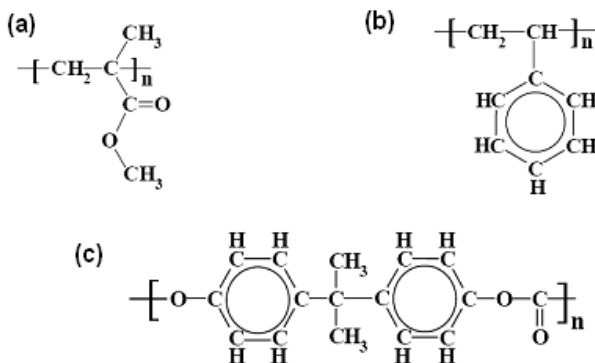


Figura 15 – Estrutura molecular: (a) PMMA; (b) PS e (c) PC.

A tabela 1 resume os índices de refração e diâmetros da FOP de uso mais freqüente. Núcleo duro de silício (HCS) e fibras de plástico revestido (PCS) são incluídos para comparação.

Tabela 1 – Comparação de alguns parâmetros correspondentes a FOP de composição de núcleos diferentes.

Material	Índices de refração Núcleo/Revestimento	Diâmetro do núcleo (µm)
PMMA	1,492 / 1,417	250-100
OS	1,592 / 1,416	500-1000
PC	1,582 / 1,305	500-1000
CYTOP	1,353 / 1,34	125-500
PCS - HCS	1,46 / 1,41	110-1000

2.2.5 Processo de Fabricação da FOP

Segundo a empresa FASA, fabricantes de sistemas com fibras óticas, a fibra ótica polimérica (FOP) é fabricada mediante o processo de extrusão de polímeros. É um processo industrial, usado para produzir objetos com seções transversais definidas e superfícies com um acabamento excelente. A matéria prima é introduzida por um funil em forma de grãos pequenos. O polímero fundido é forçado a passar através de um funil no outro extremo por meio do empuxo gerado pela ação giratória do parafuso de Arquimedes, que gira concentricamente em uma câmara a temperaturas controladas, com uma separação mínima entre os dois elementos. A figura 16 ilustra o processo interno de extrusão.



Figura 16 – Processo de extrusão.

www.setor1.com.br/extrusao/dese_extru.htm

Zubia (2001) apresenta o processo de fabricação da fibra por extrusão. Observa-se na figura 17 que a extremidade inferior do extrusor é aquecida com ajuda de uma estufa a uma temperatura de aproximadamente 200°C, de modo que deve adquirir a viscosidade necessária para ser capaz de expulsar o polímero para baixo. A velocidade de extrusão e a velocidade de rotação do mandril é controlada por um mecanismo regulador para que a fibra tenha o diâmetro desejado constante. Antes da fibra ser coletada em rolos, passa por controles de diâmetro e aquecimento.

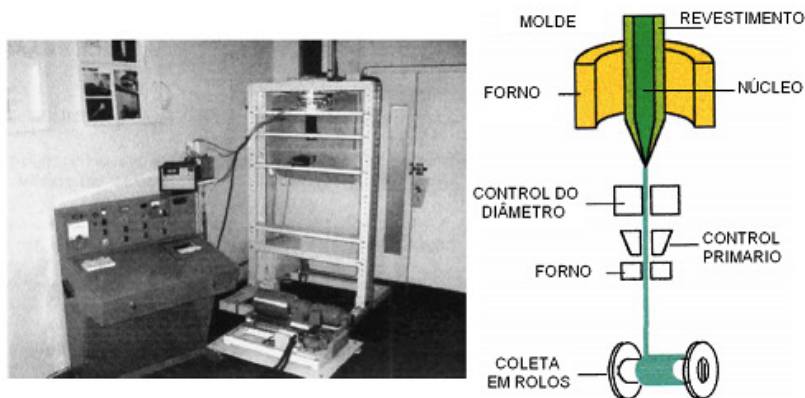


Figura 17 – Processo de fabricação da fibra.
Zubia, 2001.

Durante o processo de extrusão, as relações geométricas entre o núcleo e o revestimento são mantidas constantes, embora possa haver uma redução de 300-1 a partir do diâmetro da preforma para o diâmetro final da fibra.

2.2.6 Vantagens das FOP

Segundo Martins (2007), do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) da UFRJ, a tecnologia das FOP apresenta praticamente todas as vantagens (com exceção da transparência ótica das fibras), proporcionadas pela tecnologia das fibras de sílica.

As principais vantagens das fibras óticas poliméricas sobre as fibras de vidro, segundo Zubia (2001), são:

- Maior flexibilidade;
- Fácil instalação;
- Alta ductilidade (ou módulo baixo) e resistência a impactos e vibrações;
- Baixo custo de produção;
- Pesam aproximadamente 60% menos do que a fibra de vidro; e
- Facilidade e segurança para manipulação.

Os produtos de fibra polimérica são a melhor opção para aplicações nas intempéries, já que não apodrecem, não absorvem umidade, são resistentes à radiação UV e são estáveis à mudanças de temperatura, oferecendo assim, uma longa vida livre de manutenção e confiabilidade.

2.2.7 Aplicações da Fibra Ótica Polimérica

De acordo com Appajaiah (2006), as principais aplicações da fibra ótica incluem sistemas de telecomunicações civis e militares, redes de área local (LANs), sistemas de televisão, sistemas industriais de controle, sistemas de distribuição de informação, sistema de cabos submarinhos, sistemas automotrizes, sistemas domésticos de áudio, vídeo, segurança, etc. Outro dos campos beneficiados com a tecnologia da fibra ótica tem sido a medicina nos tratamentos de cirurgia interna. Utilizando fibras ópticas plásticas podem eliminar ou cortar tecidos sem necessidade de realizar cortes externos ao paciente. São utilizadas também na fotografia a cor dos órgãos internos com o fim de facilitar a apreciação de lesões que os raios X ou outros métodos não conseguiriam ver.

Com a fibra ótica se podem construir sensores, lentes, intensificadores da imagem e outros dispositivos ópticos de grande precisão que são empregados em câmeras, Xérox, leitores de códigos de barras e imagens (scanners), máquinas de fax, etc. por outra parte, os artistas e publicitários tem utilizado durante muito tempo fibras ópticas para criar efeitos espetaculares de luz.

A figura 18 mostra como as fibras ópticas plásticas, devido a sua alta atenuação que limita o envio de informação, são utilizadas geralmente para iluminação ou decoração.

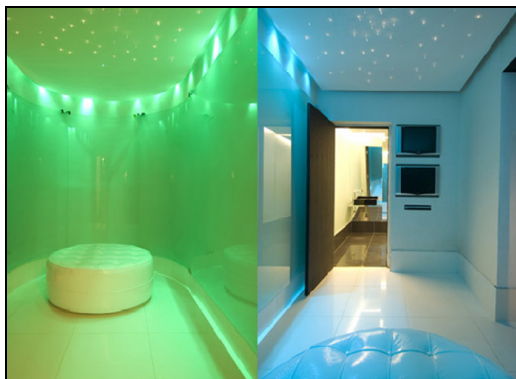


Figura 18 – Interiores iluminados com FOP.
www.fibraotica.com.br

Hoje a fibra ótica polimérica está sendo usada como componente na confecção de concreto translúcido.

2.3 Concreto Translúcido

O concreto é um material extraordinário, não só porque ele pode ser moldado em uma variedade de formas complexas, como também pode fornecer efeitos especiais de superfície. Esculturas esteticamente agradáveis, murais e detalhes arquitetônicos podem ser criados através da escolha adequada dos componentes do concreto, formas e técnicas na textura, (MEHTA 2008).

O arquiteto húngaro Áron Losonczy, em parceria com a Universidade de Budapeste, na Hungria, e com a Universidade de Aachen, na Alemanha, desenvolveu uma tecnologia que permite a passagem de luz pelo interior do concreto. A técnica consiste em justapor paralelamente fios de fibra ótica que percorrem o bloco de um lado a outro. Assim, as sombras projetadas no lado claro podem ser vistas na parte escura, como se observa na figura 19. O produto, batizado de Litracon (Light Transmitting Concrete - concreto transmissor de luz), pode ser aplicado em estruturas verticais, como paredes e painéis, ou horizontais, como piso elevado iluminado na parte inferior.

Os direitos de propriedade intelectual do bloco “Litracon” estão protegidos pelo escritório de patentes e leis Danubia da Hungria. O concreto translúcido, segundo a ficha técnica publicada pela empresa

Litracon, é produzido em blocos pré-fabricados, com acabamentos especiais e dimensões fixas de produção das peças. Os blocos apresentam dimensões máximas de 1200X400mm com espessuras que variam entre 25 e 500mm se compõe com um 96% de concreto e 4% de fibra óptica, com uma densidade de 2100 – 2400 kg/m³, uma resistência à tração na flexão e compressão de 7MPa e 50MPa, respectivamente. Disponível em: www.litracon.hu.

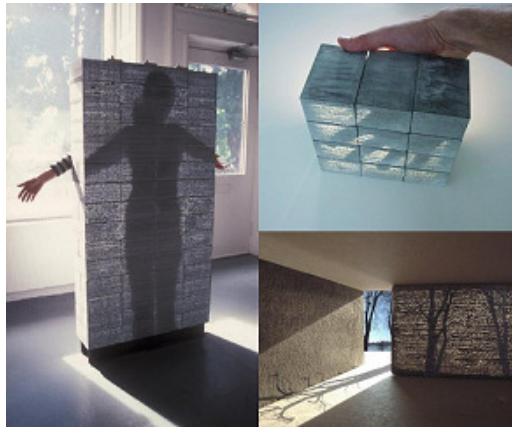


Figura 19 – Paredes feitas com blocos translúcidos - LITRACON.
www.litracon.hu

Segundo a associação de cimento Portland (PCA) o concreto que transmite luz, ou também conhecido como concreto translúcido, é um concreto composto por milhares de fios de fibras óticas que são misturadas na matriz cimentícia para transmitir a luz. As fibras correm paralelas umas às outras, a transmissão de luz se gera entre as duas faces do elemento de concreto no qual estão inseridas as fibras. As fibras ópticas transmitem luz com tanta eficiência que não existe praticamente nenhuma perda de luz conduzida através das fibras, sendo possível até reconhecer as cores através do concreto. Disponível em: <http://www.cement.org/decorative/translucent.asp>.

Segundo esta mesma associação, a mistura do concreto translúcido não contém agregado graúdo. A resistência à compressão superior a 70 MPa é comparável à dos concretos de alta resistência. No entanto, devido ao processo de fabricação, elementos para aplicações estruturais ainda não foram produzidos.

Originalmente os filamentos de fibra foram colocados individualmente no concreto, tornando a produção demorada e cara.

Recentemente, os processos de produção semi-automática usam tecido de fibra, em vez de filamentos individuais. Empresas como LITRACON e LUCCON usam tecidos que são inseridos no concreto alternadamente nos moldes em intervalos de aproximadamente 2mm a 5mm. Camadas menores ou mais finas permitem que uma maior quantidade de luz passe através do concreto. Após o desmolde, o material é cortado em painéis ou blocos da espessura especificada e, em seguida, a superfície é normalmente polida, resultando em acabamentos que variam de semi-brilho a alto brilho.

Na figura 20(a) e 20(b) se observam as duas faces de um bloco translúcido de 14x16cm, produzido na UFSC, sendo iluminado pelo sol e seu efeito no verso. Na figura 20(c) e 20 (d) observa-se a face de uma placa translúcida de 28x32cm iluminada e no verso o efeito gerado pela adição de FOP.

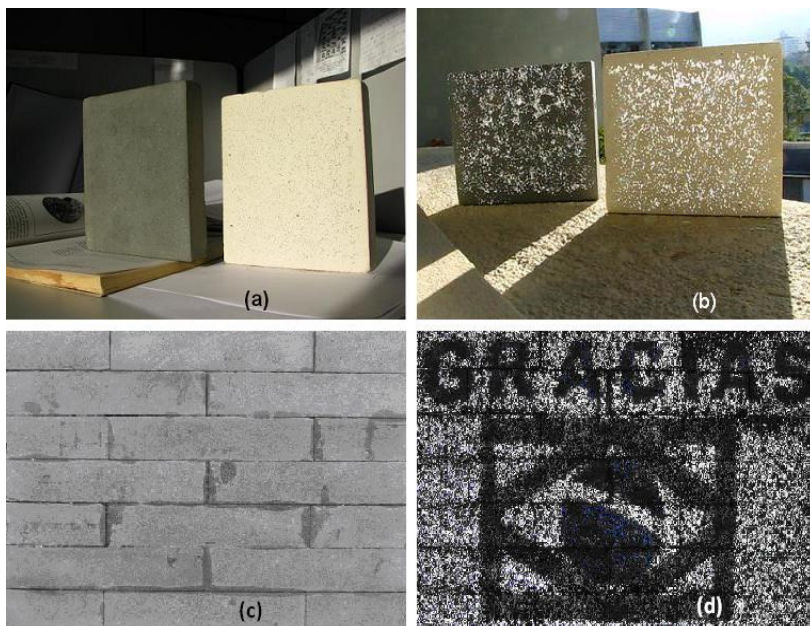


Figura 20 – Placas de argamassa translúcidas produzidas na UFSC. (a) Face iluminada pelo sol; (b) Efeito produzido no verso; (c) Face iluminada com luz artificial; (d) Efeito produzido no verso da placa.

2.3.1 Aplicações

O setor da construção civil e arquitetura já estão aproveitando os benefícios que fornece a fibra. Concreto e fibra óptica, dois materiais que tem sido utilizados em paralelo com finalidades diferentes, hoje se unem para criar um novo material: um material com grandes possibilidades de aplicação dentro do setor da construção.

As imagens a seguir mostram os projetos desenvolvidos pela empresa LITRACON, imagens disponíveis em: www.litracon.hu.

A figura 21 apresenta uma placa com um sistema de iluminação que quando é ligado ressalta o nome da empresa. A parte que fica escura é devido a ausência de fibras ópticas, parte que não pode transportar a luz e gera esse efeito.

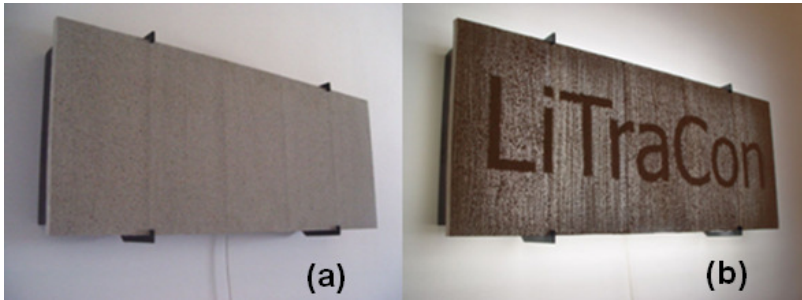


Figura 21 – Logos: (a) Sem luz; (b) Com luz.
www.litracon.hu

A figura 22 mostra como o material pode ser utilizado como fechamento vertical ou simplesmente decorativo numa janela.



Figura 22 – Distribuição e fechamento dos espaços. Banheiros e janelas.
www.litracon.hu

Na figura 23 o material translúcido é utilizado na decoração de pisos e paredes.



Figura 23 – Elementos decorativos de exteriores.
www.litracon.hu

A figura 24 mostra um portão de uma casa feito com material Litracon. Dentro da “garagem” da casa é possível identificar as silhuetas das pessoas que circulam pela rua e sombras das árvores.

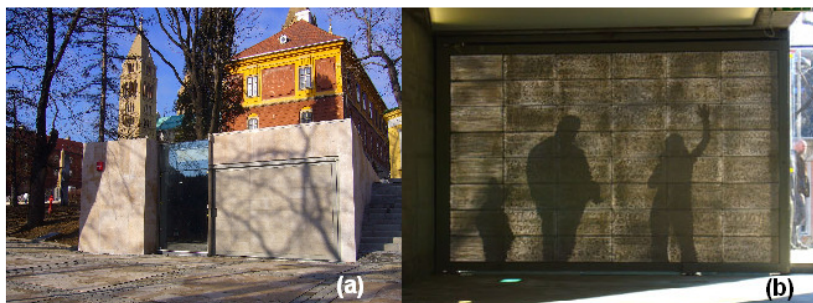


Figura 24 – Portão de uma garagem com concreto translúcido. (a) Vista exterior; (b) vista interior.
www.litracon.hu

O aspecto mais interessante deste fenômeno de “transparência” do material é a nitidez com a qual as sombras chegam a ser visíveis no outro lado da parede, fenômeno que poderia ser muito prático nas vedações verticais.

Estudos anteriores mostraram que alguns tipos de fibras poliméricas, utilizadas normalmente para reforço, sofrem alterações no seu desempenho mecânico conjunto com a matriz, o que depende da idade do compósito e das condições de exposição. Portanto, partindo da idéia de Lasonczi, foi desenvolvido um programa experimental que

permitisse analisar a vulnerabilidade da fibra ótica plástica quando exposta em diversos ambientes agressivos e sua influência no desempenho das placas de argamassa translúcida, produzidas com cimento Portland e FOP.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa Experimental

O programa experimental foi dividido em três etapas:

- A primeira etapa abarca a descrição e a caracterização dos materiais empregados na confecção das argamassas, os procedimentos de mistura, moldagem e preparação das placas translúcidas.
- Na segunda etapa, as placas translúcidas foram expostas por períodos de tempo de 60 e 90 dias em 4 ambientes diferentes: ciclos de secagem/molhagem (água/estufa), temperatura e umidade controlada (laboratório), intempérie (terraço) e imersão parcial em água. Avaliaram-se a resistência à tração na flexão aos 28, 90 e 120 dias de idade, a transmitância antes e depois da exposição, absorção de água por imersão e a condutividade térmica.
- Na terceira etapa, mediante microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia no infravermelho foi analisada a influência dos ambientes agressivos, como os álcalis presentes na matriz cimentícia, solução saturada de hidróxido de cálcio, solução de Lawrence e métodos para acelerar a degradação, na estrutura da FOP.

3.2 Materiais Utilizados e Caracterização

Cimento Portland, areia fina, aditivo superplastificante e fibras óticas plásticas foram os materiais empregados na confecção dos corpos de prova. A seguir se apresenta uma descrição e caracterização detalhada.

3.2.1. Cimento

Com o intuito de gerar um ambiente mais agressivo para atacar as fibras, foi escolhido o Cimento Portland CP V ARI RS na confecção dos corpos-de-prova de argamassa, pois este cimento produz uma maior quantidade de Ca(OH)_2 , já que é composto quase que totalmente por clínquer moído. O Cimento foi fornecido pela indústria Votorantim. Nas tabelas 2 e 3 apresenta-se a ficha técnica do cimento fornecida pelo fabricante.

Tabela 2 – Caracterização física do cimento CP V ARI RS.

Ensaio	NBR N°	Unidade	X	Max.	Mín.	Esp. Norma
Área Específica (Blaine)	NM76/98	m ² /Kg	499	523	469	≥ 300
Massa Específica	NM23/01	g/cm ³	3,09	-	-	Não aplicável
Finura-Resíduo Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	0,2	1,00	0,10	≤ 6,0
Finura-Resíduo Peneira de 0,044mm (#325)	12826/93	%	1,5	2,50	0,80	Não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/02	%	29,7	31,80	28,80	Não aplicável
Início de Pega	NM65/03	min	188	200	165	≥60min
Fim de Pega	NM65/03	min	259	275	230	≤480min
Expansibilidade de Le Chatelier a Quente	11582/91	mm	0,48	1,00	0,00	<ou=5,0
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)						
Idade (Dias)	Mínimo	Máximo	Média		Desvio	
1	26,0	29,3	27,5		1,1	
3	34,80	37,20	36,14		0,7	
7	39,40	41,70	40,40		1,0	
28	45,90	47,70	46,82		0,9	

Tabela 3 – Caracterização química do cimento CP V ARI RS.

Ensaio Químico RX NBR 14656/01	NBR N°	Unid.	X	Max.	Mín.	Esp. Norma
Perda ao Fogo PF	NM18/04	%	3,56	3,88	3,28	≤ 4,5
Óxido de Magnésio MgO	NM14/04	%	6,16	6,41	5,91	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico SO ₃	NM16/04	%	3,34	3,69	3,05	≤ 4,5
Anidrido Carbônico CO ₂	NM20/04	%	2,37	2,84	2,06	≤ 3,0
Resíduo Insolúvel RI	NM15/04	%	0,7	1,00	0,35	≤ 1,0
Equivalente Alcalino Em Na ₂ O	-----	%	0,70	-----	-----	Não aplicável

3.2.2. Areia

As FOP ao serem introduzidas na argamassa precisam se manter paralelas entre si, e uma granulometria grossa não permitiria uma boa distribuição. Portanto, utilizou-se uma areia fina natural, de quartzo, proveniente de Imbituba, na confecção da argamassa translúcida.

A distribuição granulométrica da areia fina empregada na confecção das argamassas se apresenta na figura 25 representada pela linha com círculos cheios; já as linhas contínuas, sem círculos, representam as faixas granulométricas recomendadas para composição de agregados miúdos pela NBR 7211:2005. Os limites granulométricos foram determinados segundo a mesma norma. As características físicas da areia se apresentam na tabela 4.

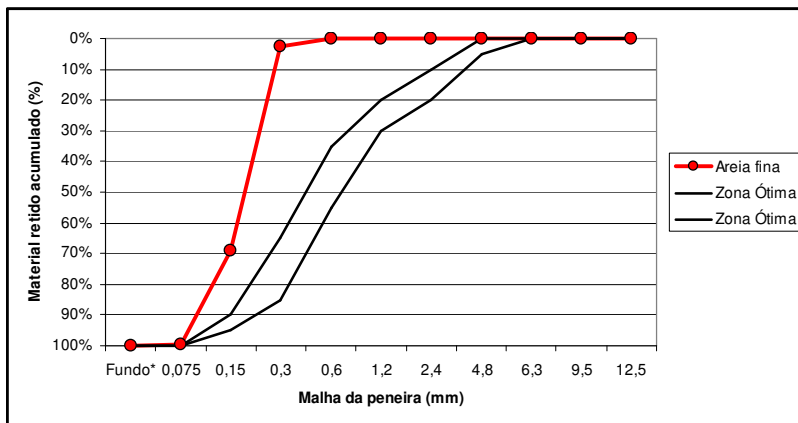


Figura 25 – Distribuição granulométrica da areia fina.

Tabela 4 – Características físicas da areia.

Módulo de finura	2,71
Diâmetro Máximo (mm)	0,300
Diâmetro Mínimo (mm)	0,075
Massa específica (kg/dm ³)	2,67
Massa unitária (kg)	1,44
Material pulverulento (%)	0,27

3.2.3. Aditivos

Na confecção das placas de argamassa utilizou-se aditivo superplastificante GLENIUM 51 ou “reductor de água de alta eficiência” como o reconhece a ASTM C 494-92, produzido pela BASF a base de policarboxilato de sódio. Os dados técnicos do aditivo se apresentam na tabela 5.

Tabela 5 – Características físico-químicas do GLENIUM 51.

Função	Aditivo superplastificante de terceira geração	
Base Química	Éter policarboxílico	
Aspecto	Líquido	
Cor	Branco turvo	
Ação secundaria	Redutor de água	
Solubilidade em água	100%	
Não contém cloreto de cálcio ou ingredientes a base de cloreto		
Teste	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido branco turvo	Visual
pH	5 a 7	-
Densidade	1,067 - 1,107	g/cm3
Sólidos	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	< 150	cps

O aditivo usado atende requisitos das normas brasileiras NBR 11768 (tipo P e SP) e ASTM C494 (tipo A e F).

3.2.4. Fibras Óticas Poliméricas

Na produção das placas translúcidas empregou-se fibra ótica polimérica, utilizada na fabricação de abajures decorativos. A procedência é da China, sem informações sobre o fabricante, nem composição do material.

A escolha da fibra ótica polimérica se deveu ao fato de apresentar maior flexibilidade, menor custo e potencialmente maior resistência ao meio alcalino, quando comparada com as fibras óticas de vidro.

A metodologia e os aparelhos utilizados na caracterização físico-mecânica das fibras óticas poliméricas são detalhados a seguir:

3.2.4.1 Textura Superficial

A caracterização superficial da FOP foi realizada no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), da UFSC, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JSM-6390SV apresentado na figura 26.



Figura 26 – Microscópio Eletrônico de varredura (MEV).

Inicialmente FOP de um centímetro de comprimento foram lavadas com álcool, deixando-as livres de umidade e óleo para realizar a análise da superfície. Foi utilizada uma cola de carbono para aderir as FOP nos porta-amstras antes de receber a camada de ouro. A cobertura das FOP foi feita por pulverização catódica, no equipamento LEICA EM SCD 500 de alto vácuo localizado no LCME. Uma vez cobertas com ouro, as amostras foram fixadas no porta-amstras e colocadas na câmara de amostras do MEV, considerando a melhor orientação em relação ao feixe de varredura e o coletor de elétrons secundários. O procedimento se representa na figura 27.

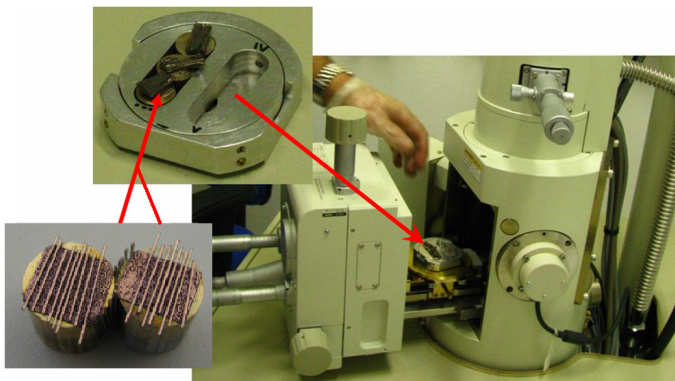


Figura 27 – Montagem das FOP na câmara do MEV.

As imagens apresentadas pelo MEV deixaram em evidente uma forte degradação da superfície das FOP virgens (figura 28a), ou seja, fibras que não foram expostas aos ambientes agressivos propostos. A degradação foi atribuída ao álcool, pois a FOP esteve em contato só com álcool.

A figura 28b mostra a superfície da FOP virgem lavada com água deionizada e analisada mediante MEV. Manteve-se o mesmo procedimento de preparo e análise das amostras, podendo assim, comparar as superfícies das fibras lavadas com álcool e com água deionizada.

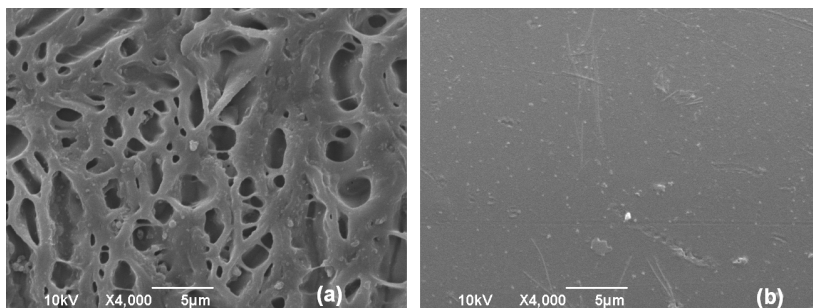


Figura 28 – Textura superficial da FOP visualizada no MEV. (a) FOP lavada com álcool; (b) FOP lavada com água deionizada.

Foram obtidas imagens de alta resolução das FOP que permitiram caracterizar suas texturas superficiais. As imagens do MEV das FOP sem exposição mostraram uma superfície lisa com alguns riscos ou defeitos de fabricação e com uma seção transversal de forma circular como se apresenta nas figuras 29 e 30.

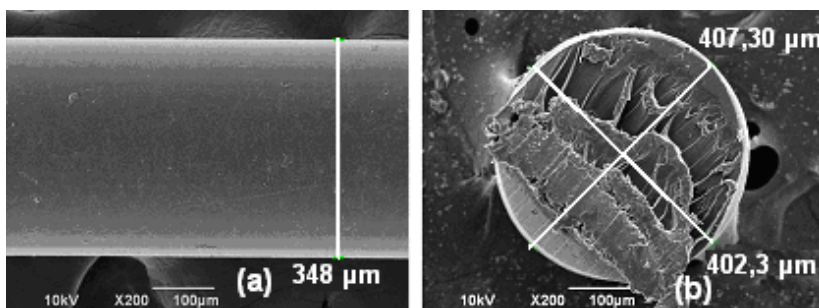


Figura 29 – Seção transversal da FOP.

A variabilidade dos diâmetros se encontra entre dos 348 e 411 µm. Os aumentos usados foram de até X5000. Inicialmente utilizou-se 20kV, já que com uma aceleração de voltagem alta a resolução da imagem é melhor, mas a fibra não resistiu e acabou queimando-se. Assim os ensaios foram feitos com uma aceleração de voltagem de 10kV.

Foi possível identificar o núcleo e o revestimento das FOP. Percebe-se na figura 29b um anel branco identificado como revestimento do núcleo. Na figura 30 observa-se o revestimento descolado do núcleo o que facilitou sua identificação.

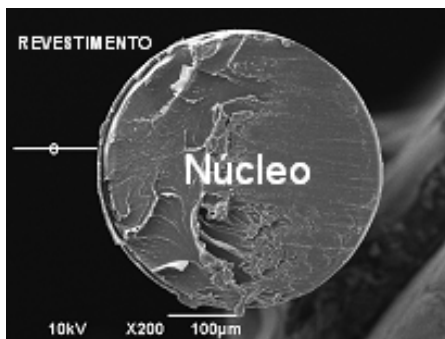


Figura 30 – Núcleo e revestimento da FOP.

A espessura da camada que reveste o núcleo de uma das fibras óticas poliméricas pode ser observada na figura 31. Acredita-se que o corte brusco das fibras possa ter influenciado para que o revestimento se descolasse do núcleo.

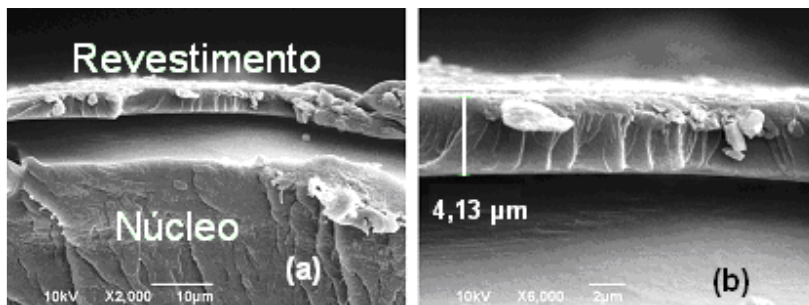


Figura 31 – Espessura da camada de revestimento de uma FOP.

As noções básicas da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), microanálise, especificamente sobre a espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e Espectroscopia no Infravermelho (EIV) se apresentam no anexo F.

3.2.4.2 Absorção de Água

Trinta (30) FOP foram colocadas na estufa a 50°C durante 200 horas, determinando-se assim a massa seca (m_s). Posteriormente as FOP foram colocadas em um frasco com água deionizada, o recipiente foi vedado e mantido na sala climatizada do laboratório de materiais de construção civil (LMCC). Por períodos de tempo de 24, 50, 100, 200, 400 e 800 horas foram feitas medições, determinando assim a massa (m_u). Antes de realizar cada medição da massa úmida, a fibra era enxugada com papel toalha úmido para retirar a quantidade de água superficial em excesso.

A figura 32 representa a variação da massa do conjunto de 30 amostras de FOP durante a imersão. Após 800 horas de imersão a massa incrementou em 0,05%. Observa-se que as FOP não absorveram água.

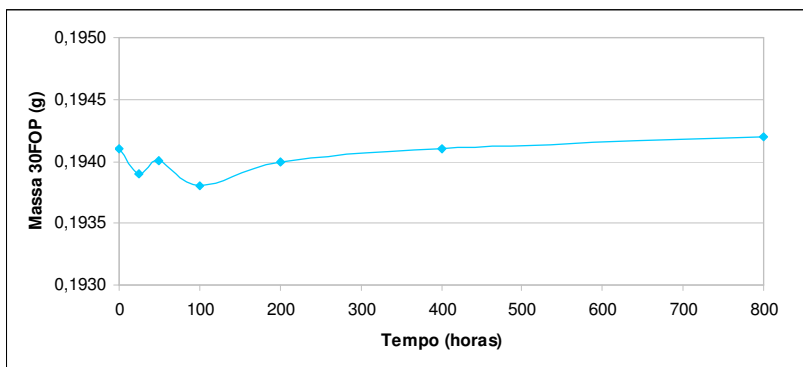


Figura 32 – Variação da massa das FOP imersas em água deionizada.

3.2.4.3 Propriedades Mecânicas das Fibras

Tensão de tração e módulo de elasticidade foram as propriedades mecânicas das FOP avaliadas conforme a norma ASTM D3822/99. Os ensaios foram realizados na máquina Instron 5569 (figura 33), localizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC.

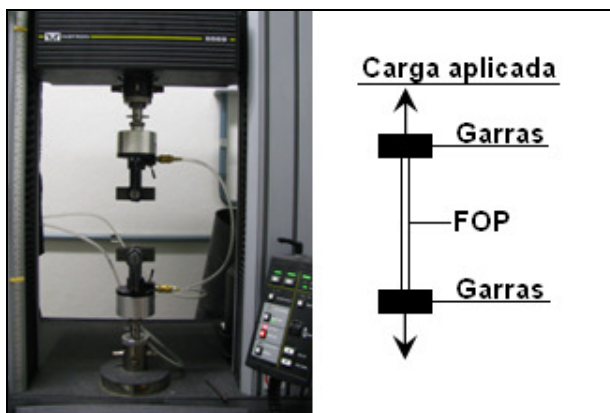


Figura 33 – FOP ensaiada a Tração na máquina Instron.

O módulo de elasticidade foi calculado pelo método da corda, cujo valor é calculado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação. A linha é traçada de um ponto representando a deformação longitudinal de $50 \mu\text{m/m}$ até o ponto que corresponde a 40% da carga última (MEHTA, 2008). Os valores apresentados na tabela 6 correspondem à carga máxima. Os resultados individuais e médios apresentam-se a seguir.

Tabela 6 – Resultados individuais da resistência à tensão na tração, deformação e módulo de elasticidade das FOP.

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Carga (N)	Tensão de Tração (MPa)	Deformação específica (mm/mm)
1	2,92	7,026	73,023	0,03708
2	3,36	8,018	83,331	0,03796
3	2,92	6,998	72,74	0,04023
Média	3,07	7,347	76,365	0,03842

Observou-se na figura 34 que a fibra 1-FOP-5 após a tensão máxima apresentou uma redução de 15,3% mantendo uma tensão de tração constante. A partir desse ponto a fibra manteve uma variação de 1,2% na tensão até o ensaio ser interrompido.

A FOP na sua estrutura mais simples se compõe de núcleo e revestimento, sendo este o responsável pela reflexão interna da luz ao longo da fibra. Acredita-se que a tensão máxima registrada pela FOP seja a tensão do revestimento e não do conjunto núcleo-revestimento, ou

seja, o revestimento não estaria confinando mais a luz no interior da FOP. Portanto, a deformação específica da fibra ótica polimérica foi considerada só até a tensão máxima.

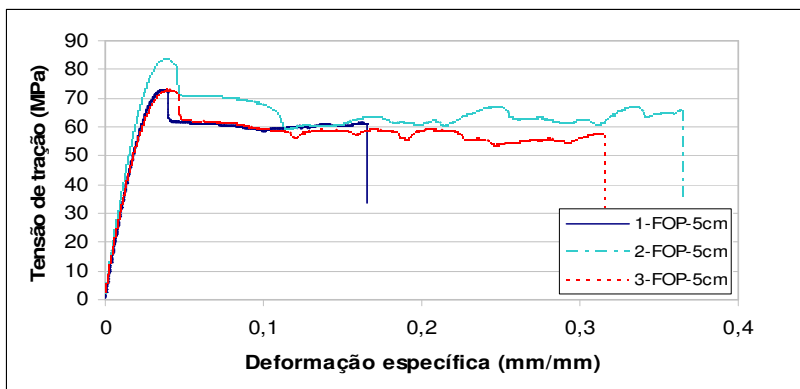


Figura 34 – Tensão de tração x deformação específica da FOP.

3.2.4.4 Espectroscopia no Infravermelho

A fibra ótica plástica utilizada na pesquisa não apresenta uma caracterização físico-química. Como foi mencionado no item 2.2.4, geralmente a matéria prima pode ser de PMMA, PS ou PC.

A determinação dos grupos funcionais da FOP foi feita no espectrômetro FTLA 2000 da ABB (figura 35), gerenciado pelo software IRDM (Infrared Data Manager) por transformada de Fourier, localizado na Central de Análises do Departamento de Química da UFSC.

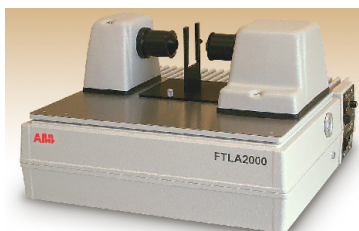


Figura 35 – Espectrômetro utilizado nos ensaios - FTLA2000.
Manual do usuário, 2002.

Foram introduzidas 10 FOP de 4cm de comprimento em um frasco de vidro, posteriormente foi colocado o tetrahidrofurano como solvente (THF - C_4H_8O), vedando o frasco até as FOP se dissolverem.

A solução foi colocada em uma cela de seleneto de zinco (ZnSe), deixando secar até formar um filme. Depois a cela foi colocada no porta-amostras e instalada no espectrômetro para efetuar as leituras. Foram feitos 5 “scans” da amostra. Inicialmente foi feito um “branco”, ou seja, um espectro da cela, para descontar o espectro dela do resultado final.

O espectro da FOP se apresenta na figura 36 e os números de onda na tabela 7.

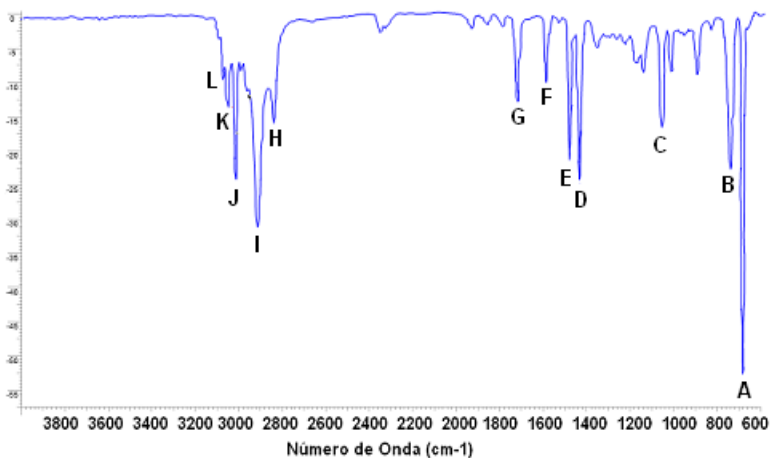


Figura 36 – Espectro da FOP sem exposição.

Leon et al. (2008) realizou testes de infravermelho do PS utilizando THF como solvente. O espectro apresentou números de onda $3081,2\text{ cm}^{-1}$ e $3001,11\text{ cm}^{-1}$, correspondem ao estiramento aromático C-H; $2923,91\text{ cm}^{-1}$ e $2850,40\text{ cm}^{-1}$ correspondem a estiramento assimétrico e simétrico CH_2 ; $1943,19 - 1728,23\text{ cm}^{-1}$ correspondem a anel aromático monosubstituído; $1452,28\text{ cm}^{-1}$ corresponde à deformação $CH_2 + C=C$ do anel aromático; e $1069,65\text{ cm}^{-1}$ corresponde a vibrações de deformação no plano C-H.

Tabela 7 – Análise das bandas do espectro obtido infravermelho das FOP sem exposição.

Ponto	Número de Onda (cm ⁻¹)
A	700,11
B	756,04
C	1068,49
D	1450,36
E	1492,79
F	1600,80
G	1732,91
H	2851,54
I	2924,83
J	3026,09
K	3059,84
L	3081,06

Comparando os espectros e os números de onda da FOP virgem com o espectro de infravermelho do PS (anexo B) realizado por Leon et al. (2008) e o espectro do PMMA obtido por Ramesh et al. (2007) (anexo B), pode-se concluir que a FOP utilizada na pesquisa é de PS e não de PMMA, como se pensava inicialmente, já que o PMMA é o material mais utilizado na fabricação de FOP.

3.3 Produção das Placas Translúcidas

Foram moldados corpos-de-prova de argamassa com relação cimento:areia 1:2; a/c de 0,43; aditivo super plastificante 0,7% e 2,5% de adição de fibras óticas poliméricas em relação a massa total. Na produção das argamassas foi usada uma argamassadeira mecânica de eixo planetário, cujas velocidades de rotação para a pá são de 140+10rpm (velocidade 1) e 285+10rpm (velocidade 2), e para o planetário de 62+-5rpm e 125+10rpm.

Cabe observar que todas as argamassas foram produzidas com o mesmo procedimento de mistura, conforme descrito na norma NBR 7215/96, sendo este apresentado a seguir:

P1 - 0s → colocar o cimento na cuba;
P2 - 5s → adicionar a água;
P3 - 15 - 20s → deixar bater na velocidade 1 para homogeneizar cimento e água;
P4 - 30s - 1 min → adicionar o agregado;
P5 - 1,0 - 1,5min → deixar bater na velocidade 1 para homogeneizar pasta e agregado;
P6 - 1,5 - 2,0min → parada para raspagem do material acumulado nas pás e parede da cuba e incorporação do aditivo;
P7 - 2,0 - 3,0min → bater na velocidade 1.

Uma vez misturados os materiais moldaram-se os corpos-de-prova prismáticos, com dimensões (40x40x160)mm.

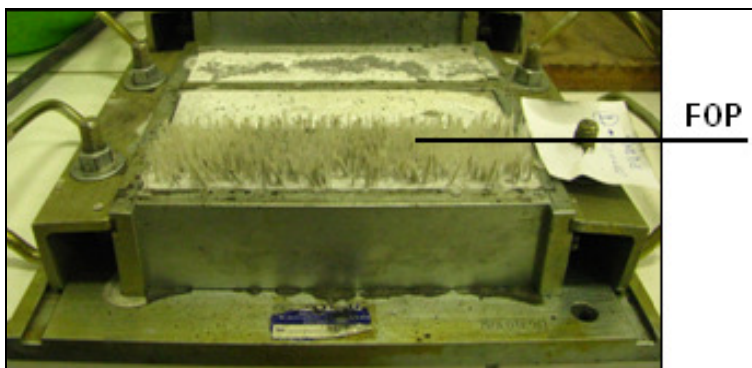


Figura 37 – Moldagem dos prismas.

Após a moldagem das argamassas, ainda em estado fresco, as fibras foram introduzidas manualmente. A distribuição das fibras deverá ser transversal à base da fôrma como mostra a figura 37.

O aditivo adicionado deve proporcionar uma mistura adequada para que as fibras possam ser introduzidas sem esforço e ao mesmo tempo a mistura deverá conseguir que as fibras se mantenham em pé, paralelas entre elas, por si só.

Os prismas passaram por um período de cura por imersão de 15 dias e posteriormente, de acordo com Betioli (2003), foram cortados obtendo placas com dimensões de (10x40x160)mm.

De cada prisma foram retiradas duas (2) placas. Obtiveram-se um total de 54 placas translúcidas e 27 placas sem adição de fibra ótica

polimérica. O corte dos prismas foi realizado em uma marmoraria (figura 38a).

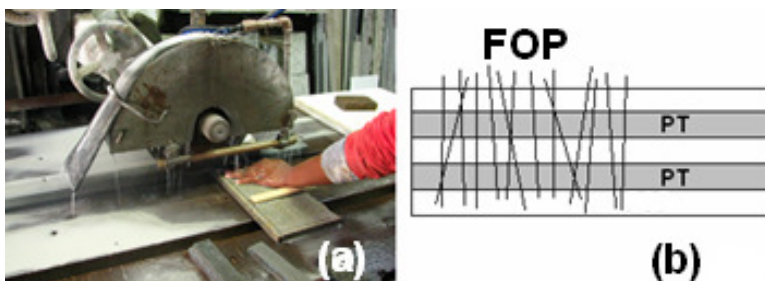


Figura 38 – (a) Corte dos prismas; (b) Distribuição das FOP no interior dos prismas.

A figura 38b mostra em cinza as duas placas retiradas do prisma e em branco o corte feito pelo disco e também ilustra o que foi evidenciado nos prismas após a desmoldagem. Observou-se que as FOP não encostaram no fundo da fôrma, ficando assim uma camada de argamassa obstruindo a saída da luz pelas pontas da FOP. Por tanto foi feito um corte de 0,5mm para retirar essa camada e garantir a condução da luz de todas as FOP.

3.4 Ambientes de Exposição das placas Translúcidas

As placas foram expostas em dois ambientes de envelhecimento natural (Laboratório e Terraço) e dois ambientes de envelhecimento acelerado (Água/Estufa e Imersão parcial) com o intuito de analisar a vulnerabilidade da fibra ótica plástica e a influência na resistência à tração na flexão. Os ambientes são descritos a seguir.

LABORATÓRIO. Foi escolhida a sala climatizada do laboratório por manter uma temperatura ambiente de 23°C, simulando um ambiente de aplicação da placa translúcida.

ÁGUA/ESTUFA. Aumentando a temperatura aumenta-se a velocidade de reação e difusão de agressivos; portanto foram realizados 12 ciclos de secagem/molhagem para as placas de 90 dias de idade e 19 ciclos para as placas de 120 dias de idade.

A molhagem consistiu na imersão das placas em um balde com água (figura 39a), permanecendo na câmara úmida do LMCC, por um período de tempo de 2 dias, a temperatura constante. Posteriormente, as

placas foram colocadas na estufa (figura 39b), a uma temperatura controlada de 50°C por um período de tempo de 3 dias, definindo-se assim a secagem e completando um ciclo. Cada vez que as placas foram colocadas no forno, inverteu-se o posicionamento, tentando evitar uma deflexão nelas.

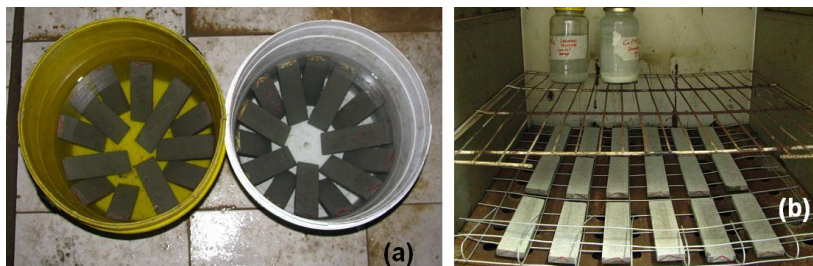


Figura 39 – Ciclos de exposição das placas (a): Molhagem - Imersas em água durante 2 dias; (b): Secagem - Mantidas na estufa durante 3 dias.

TERRAÇO. Foi escolhido o terraço do bloco B da pós-graduação de Engenharia Civil para expor as placas à intempérie. Como mostra a figura 40, foi feita uma forma de madeira com suporte para encaixar as placas, posicionando-as de tal maneira que o sol atingisse o maior tempo possível as faces das placas.



Figura 40 – Placas em exposição no terraço.

IMERSÃO PARCIAL. A água é uma das principais causas de degradação dos materiais de construção, já que penetra na matriz por capilaridade, transportando com ela substâncias nocivas. As placas com 1cm de espessura foram imersas em água até a metade (figura 41), e

foram apoiadas nos extremos para garantir maior área da face em contato com a água.

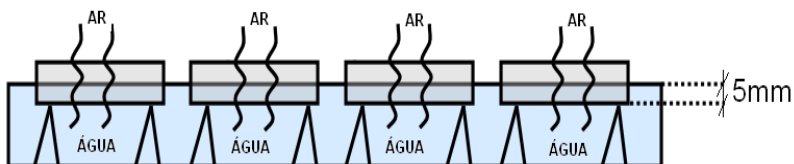


Figura 41 – Imersão parcial das placas em água.

A distribuição das placas nos diversos ambientes de exposição é apresentada na tabela 8.

Tabela 8 – Distribuição das placas com e sem FOP nos ambientes de exposição.

Cimento	Ambiente exposição	Local	Tempo de exposição - Idade (dias)	Placas	# Cps
CP V A R I R S	Laboratório	Laboratório	0 - 28	CFOP	6
				SFOP	3
	Temperatura e umidade controlada	Laboratório	60 - 90	CFOP	6
				SFOP	3
			90 - 120	CFOP	6
				SFOP	3
	Ciclos Secagem-molhagem	Água/Estufa	60 - 90	CFOP	6
				SFOP	3
			90 - 120	CFOP	6
				SFOP	3
	Intempérie	Terraço	60 - 90	CFOP	6
				SFOP	3
			90 - 120	CFOP	6
				SFOP	3
	Imersão Parcial em água	Laboratório	60 - 90	CFOP	6
				SFOP	3
			90 - 120	CFOP	6
				SFOP	3

3.5 Desempenho das Placas Translúcidas

Ensaio físicos e mecânicos foram adaptados para analisar o desempenho das placas translúcidas antes e depois da exposição a qual foram submetidas no tempo. A seguir são apresentados com detalhes os métodos e equipamentos utilizados.

3.5.1 Resistência à Tração na Flexão

O comportamento mecânico das placas de argamassa foi avaliado aos 28, 90 e 120 dias de idade na máquina Instron 5569 (figura 42) localizada no LMCC da UFSC, mediante o programa BlueHill 2.

Foram adotadas as normas ABNT NBR 12142 (determinação da resistência a tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos) e a norma ABNT Projeto: 18:316.01-002/5 (aplicável a produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibra de vidro), no desenvolvimento do ensaio.

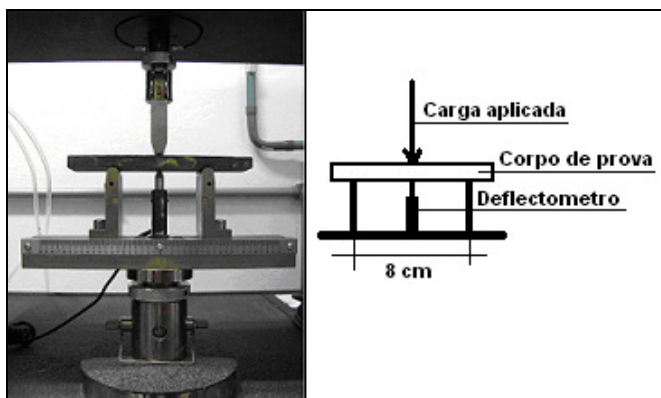


Figura 42 – Ensaio de tração na flexão na maquina Instron.

Os resultados apresentados pela máquina Instron foram conferidos pelo método ISO/DIS 679 – Methods of testing cements – Determination of strength (international Organization for Standardization), aplicando-se uma carga distribuída uniformemente na seção transversal no meio do corpo de prova bi-apoiado. A tensão de tração na flexão é dada pela equação (1):

$$\sigma = (1,5PL / bh^2), \quad (1)$$

sendo:

σ - tensão de tração na flexão (MPa);

P - carga aplicada no meio do prisma (N);

L - distância entre os apoios (mm);

b - maior lado da seção transversal do corpo de prova (mm); e

h - espessura do corpo de prova (mm).

As placas permaneceram imersas em água 36 horas antes do ensaio. Foi adotada uma velocidade de aplicação da carga de 0,1 mm/min e uma distância entre apoios de 8cm.

Esperando-se que o rompimento das placas fosse ao meio, já que o ensaio foi de 3 pontos como mostra a figura 42, foi analisada uma área aproximada de 3,50cm² no meio da placa. A análise consistiu na contagem da quantidade de fibras na região da ruptura da matriz, como mostra a figura 43, para avaliar o efeito na resistência e deformação.

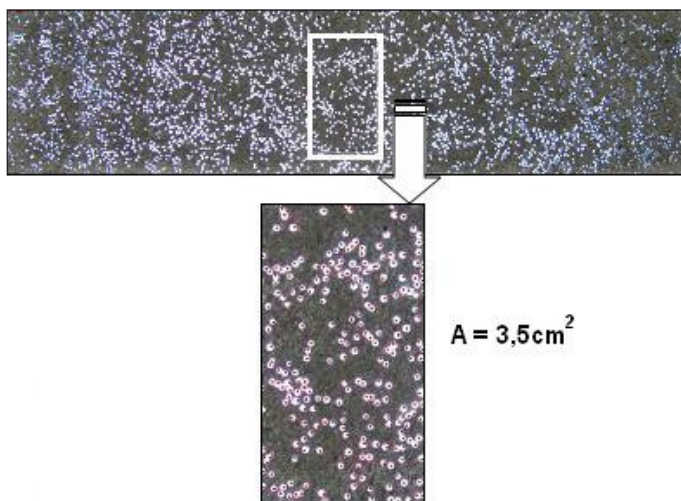


Figura 43 – FOP na região de ruptura da placa translúcida.

A placa foi iluminada em uma das faces ressaltando as fibras na outra face, podendo assim tirar uma foto da placa com as fibras. Posteriormente foi feito um aumento no meio da placa procedendo com a contagem das fibras das 54 placas translúcidas. Foi analisada a influência das fibras na região de ruptura. O deslocamento das placas e

deformação no meio do vão foi medido com um deflectômetro como se apresenta na figura 42.

O módulo de elasticidade estático de um material sob tensão ou compressão é dado pela declividade da curva σ - ϵ para o concreto sob carga uniaxial. Uma vez que a curva para o concreto é não-linear, três métodos para calcular o módulo são utilizados: módulo tangente, módulo secante e módulo corda (MEHTA, 2008). Para representar a deformabilidade das argamassas optou-se pelo módulo corda, cujo valor é calculado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação. A linha é traçada de um ponto representando a deformação longitudinal de 50 $\mu\text{m/m}$ até o ponto que corresponde a 40% da carga última.

3.5.2 Absorção de Água por Imersão

Segundo a ABNT NBR 9778:2005, absorção de água por imersão é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, sendo também o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação a sua massa em estado seco.

A determinação da absorção de água foi feita por imersão adotando a norma ABNT Projeto: 18:316.01-002/6 para produtos pré-fabricados de materiais cimentícios e a norma ABNT NBR 9778:2005.

Foram utilizadas 6 placas de argamassa com adição de FOP e 6 placas de argamassa sem adição de FOP com dimensões 10x40x160mm e 60 dias de idade. Da mesma moldagem dos prismas foi retirada uma placa CFOP e uma SFOP tentando manter as mesmas proporções e características.

Na determinação de sua massa na condição seca (m_s), utilizou-se uma estufa a uma temperatura controlada de 50°C. Segundo a norma ABNT NBR 9778, as placas devem permanecer na estufa até atingirem uma massa constante, ou seja, quando a diferença entre duas determinações de massa, com 24 horas de intervalo, não diferissem em mais de 0,5% da menor massa. Seguindo esta determinação as placas permaneceram por 7 dias na estufa.

Posteriormente, na determinação de sua massa na condição saturada (m_u), as placas permaneceram imersas em água, a temperatura ambiente, até que duas pesagens sucessivas, efetuadas em intervalos de 24 horas, não diferissem em mais de 0,5% da menor massa. Uma vez

retiradas da água as placas foram enxugadas com um pano úmido para a remoção da água superficial em excesso. As placas permaneceram 8 dias imersas. O volume foi determinado pelo método da balança hidrostática.

3.5.3 Medição da Condutividade Térmica pelo Método Fluximétrico

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, no equipamento Condutímetro Fluximétrico, seguindo os procedimentos da Norma Técnica ISO 8301- 1991: "Standart Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus", mostrado esquematicamente na Figura 44.

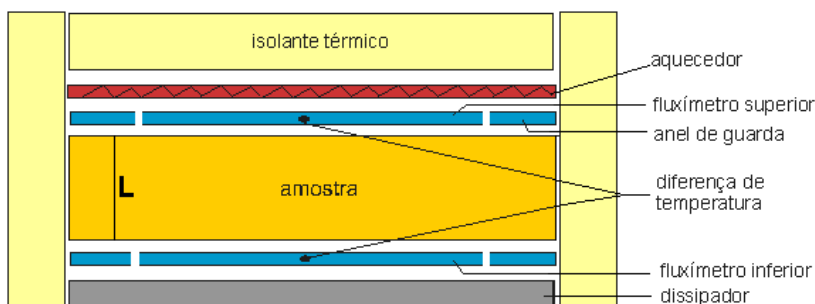


Figura 44 – Princípio do método de medição da resistência térmica.

A resistência térmica é determinada a partir da lei de Fourier:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right)}$$

onde R é a resistência térmica ($\text{m}^2 \text{ K/W}$), q_1 e q_2 a densidade de fluxo de calor medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W/m^2) e T_1 e T_2 as temperaturas superficiais da amostra medidas por termopares tipo T, dispostos em arranjo diferencial.

A condução térmica é o fenômeno segundo o qual o calor é transportado das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura no interior dos sólidos. Ela aumenta em função do teor de umidade contida nos mesmos, uma vez que a água tem uma condutividade térmica aproximadamente 25 vezes maior do que o ar. Por essa razão todas as placas foram ensaiadas sob as mesmas condições. Considerando que a amostra seja homogênea, foi possível determinar a condutividade térmica do material constituinte (λ):

$$\lambda = \frac{L}{R}$$

onde λ é a condutividade térmica (W/m K) e L é a espessura da amostra (m).

Foram efetuadas medições em 4 placas com adição de fibra ótica polimérica e uma placa de argamassa sem adição. As dimensões das placas forma de 100x100mm e espessuras de 11,5mm.

A montagem do experimento utilizado para as medições de condutividade térmica através do método fluximétrico foi semelhante ao esquema da Figura 44. A placa de aço (massa de 3kg) tem a função de garantir uma carga de aprisionamento, minimizando a formação de espaços de ar nas interfaces amostra-fluxímetros. O isolamento lateral foi formado por pedaços de algodão. A função do isolamento lateral é minimizar as fugas de calor que ocorrem pelas laterais dos fluxímetros e da amostra. A figura 45 mostra a montagem do experimento real para medição de condutividade térmica das placas.

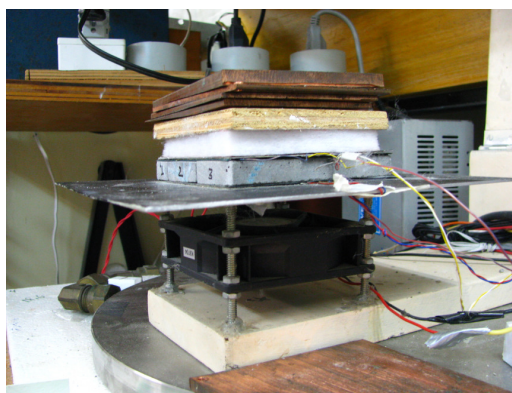


Figura 45 – Montagem para a medição da resistência térmica das placas translúcidas.

Para a alimentação da resistência aquecedora utilizou-se uma fonte de tensão corrente regulável de marca Hewlett-Packard, modelo HP 6114A (figura 46a). A tensão é regulada de modo a se obter a potência desejada, que será dissipada na resistência aquecedora.

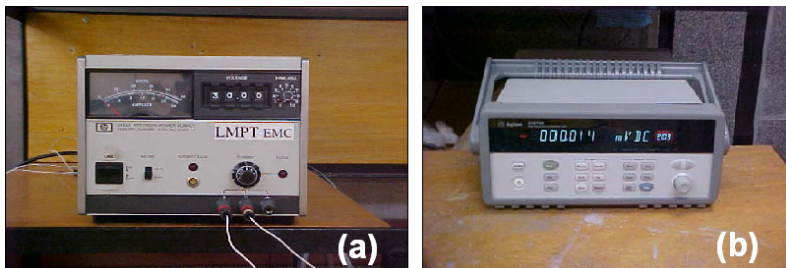


Figura 46 – (a) Fonte de alimentação da resistência aquecedora; (b) Sistema de aquisição de sinais.

Para a leitura das temperaturas durante o experimento, utilizou-se um sistema de aquisição de sinais da marca Agilent, modelo 34970A (Figura 46b). O sistema de aquisição foi conectado a um microcomputador que, em um intervalo de tempo pré-determinado, armazena os dados lidos pelo equipamento. Utilizou-se uma interface gráfica desenvolvida pelos pesquisadores do LMPT que transforma os dados lidos pelo sistema de aquisição em dados utilizáveis em planilhas eletrônicas (como por exemplo, o Microsoft Excel).

3.5.4 Transmitância das Placas de Argamassa

Inicialmente para o estudo da transmitância foi adotado um método experimental, implementado no Departamento da Engenharia Mecânica da UFSC (NICOLAU e POSSAMAI, 2006), que permite a obtenção de refletividades espectrais de superfícies opacas difusoras. Trata-se da refletividade normal-hemisférica obtida através de uma esfera de integração para a região visível e infravermelha próxima.

Foram feitas as primeiras medições em uma placa translúcida de dimensões (40x140x160mm) e observou-se que o valor transmitido foi muito baixo, ou seja, o sinal ficou no nível do ruído não sendo possível obter a medida desejada. Face estas dificuldades optou-se pelo uso de um método de medição baseado em Luxímetros (figura 47).

As medições de iluminância sobre um plano qualquer, seja horizontal, vertical ou inclinado são realizadas por meio do luxímetro, aparelho que consiste de um sensor fotométrico conectado a um mostrador. O aparelho utilizado foi um luxímetro digital da Minipa, de referência MLM-1333, emprestado pelo Laboratório de Conforto Ambiental (LABCON) da Arquitetura da UFSC. É um instrumento digital portátil e compacto. As características técnicas são apresentadas na tabela 9.



Figura 47 – Luxímetro Minipa – MLM-1333.

Tabela 9 – Características técnicas do Luxímetro.

Display	LCD 3 ½ dígitos
Taxa de Medida	Aprox. 2,5 vezes/s
Fotosensor	Fotodiodo de Silício.
Faixa de medidas	20Lux, 200Lux, 2000Lux, 20kLux
Precisão	$\pm (3\%+10D)$ pelo padrão A de iluminação CIE
Resolução	0,01Lux; 0,1Lux; 1Lux; 10Lux
Ângulo de Aceitação	$f^2 < 3\%$ da correção do coseno (150°)
Resposta Espectral	Fotópica CIE (Padrão internacional para a resposta a cor da média dos olhos humanos)
Ambiente de Operação	$0^\circ \sim 50^\circ\text{C}$
Alimentação	Bateria de 9V
Dimensões do Instrumento	190(A) x 65,5(L) x 35(P)mm
Calibrado com padrão de Lâmpada com filamento de tungstênio de 2856K	

Precisou-se de um ambiente fechado e escuro, além de uma fonte de luz e de um luxímetro para poder realizar medições sobre as placas

translúcidas, placas que posteriormente seriam expostas em ambientes diferentes.

Foi construída uma caixa de madeira (figura 48a), com dimensões internas de (14x18x41cm), vedada nos cantos para garantir que o sensor do luxímetro só fosse ativado pela fonte de luz. A caixa no seu interior foi pintada de preto fosco. Foram feitas combinações, variando as posições da fonte de luz e do sensor do luxímetro (figura 48b) e observou-se que colocando os dois no meio (posição 2B), da figura 48b, a variação na leitura era mínima, razão pela qual tanto a fonte quanto o sensor foram deixados nessa posição.

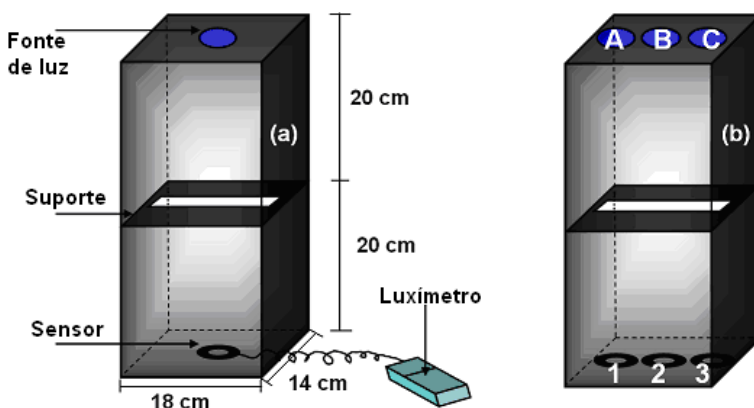


Figura 48 – (a) Caixa preta para medir a transmitância das placas; (b) Combinações de posição da fonte e o sensor.

No meio da tampa da caixa, na parte superior, foi instalada uma fonte de luz fluorescente de referência MINI LYNX ESPIRAL, marca SYLVANIA. As características são apresentadas na tabela 10. No meio da caixa foi instalado um suporte para colocar as placas. As placas ficaram a 19 cm do sensor e a 9 cm da ponta da fonte de luz.

Tabela 10 – Características da fonte de luz.

Potência (Watts)	20
Tensão (Volts)	220
Comprimento (mm)	136
Diâmetro (mm)	52
Fluxo Luminoso (lm)	1190
Eficiência (Lm/W)	60
Tonalidade	6.500 K

Antes de dar início aos ensaios, a fonte de luz e o luxímetro foram ligados, colocando no suporte uma placa sem adição de fibra; a leitura mostrada no display do luxímetro foi de zero (0,00 lux), garantindo assim a vedação da caixa. Posteriormente foi retirada a placa e registrada a intensidade incidente para efeitos de cálculo da transmitância. A transmitância foi analisada experimentalmente mediante a razão entre a intensidade incidente e a transmitida.

Antes da distribuição das placas nos ambientes determinados de exposição foi feita uma leitura inicial (lux) das 54 placas com 30 dias de idade. Foram feitas leituras aos 90 e 120 dias de idade, com 60 e 90 dias de exposição, respectivamente. Foram feitas 5 leituras para cada placa translúcida com uma duração de 7 minutos em cada leitura.

3.6 Desempenho das Fibras Óticas Plásticas

As FOP foram introduzidas na matriz cimentícia e em soluções que simulam os compostos das matrizes com o intuito de analisar a possível degradação da sua superfície com o decorrer do tempo.

3.6.1 Exposição das Fibras em Soluções Agressivas

Foram adotadas duas soluções para analisar a vulnerabilidade da FOP quando exposta em ambientes agressivos:

- Solução saturada de hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2
- Solução de Lawrence.

Escolheu-se a solução saturada de Ca(OH)_2 , já que este composto é um dos principais produtos de hidratação do cimento, além de que produz um ambiente altamente alcalino.

A solução de Lawrence (JELIDI,1991), simula a água de poro de materiais a base de cimento. A solução preparada tem uma concentração de 0,48 g/l de Ca(OH)_2 + 3,45 g/l de KOH + 0,88 g/l de NaOH.

Inicialmente foram preparados 1000 ml de cada solução, distribuídos em frascos de vidro de 500 ml. Em cada frasco foi colocada uma grande quantidade de FOP de 5 cm de comprimento. Posteriormente um frasco de cada solução foi colocado na sala

climatizada (figura 49a) e na estufa (figura 49b), a temperaturas constantes de 23°C e 50°C, respectivamente.

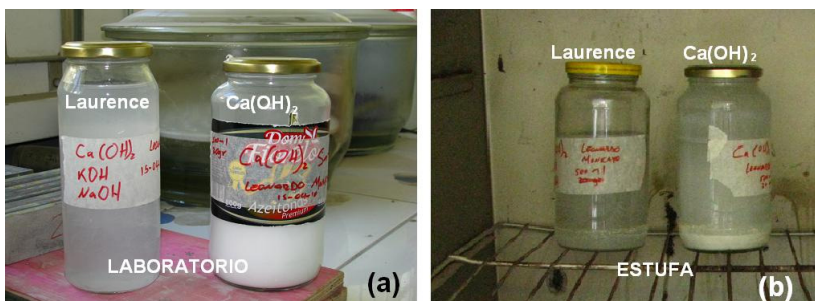


Figura 49 – FOP imersas em solução de Lawrence e Ca(OH)_2 durante 120 dias: (a) mantidas no laboratório; (b) mantidas na estufa.

No preparo da solução de Lawrence encheu-se um balão volumétrico de um litro com água até pouco menos da metade do volume. Em um béquer de 1000 ml, foi colocado um volume de água perto dos 500 ml, e foram adicionados os compostos. Foi misturado com um bastão de vidro e depois foi colocado o conteúdo dentro do balão volumétrico, lavando o béquer com uma pisseta e colocando a água de lavagem dentro do balão. Deve-se ter cuidado na hora de adicionar o NaOH, pois libera bastante calor, e pode chegar a ferver a água, se colocado em grande quantidade de uma vez só.

Após os 120 dias de exposição, foi analisada a superfície das FOP, mediante MEV e as bandas do espectro das FOP, mediante EIV.

Analizou-se também a absorção das FOP nas soluções agressivas. Quarenta (40) FOP foram mantidas por 200 horas na estufa a 50°C, determinando-se a massa seca (m_s) de cada uma delas. Cada frasco de solução agressiva recebeu 10FOP que foram previamente identificadas. Após 120 dias de imersão registrou-se a massa úmida de cada FOP.

Todo processo de lavagem e/ou preparo de amostras foi realizado com água deionizada.

3.6.2 Exposição das Fibras em Materiais a Base de Cimento

As FOP foram mantidas em matriz cimentícia CP II – Z, CP IV – 32, cimentos que fizeram parte do teste piloto e em cimento CP V ARI RS.

Inicialmente, com o intuito de dar viabilidade à pesquisa, ou seja, garantir a passagem da luz, a confecção dos primeiros blocos translúcidos foi feita com cimento CP II - Z. Posteriormente, objetivando gerar um ambiente menos agressivo para as fibras óticas poliméricas, utilizou-se cimento CP IV - 32 (com pozolana) na moldagem das placas translúcidas já que estas adições tem por objetivo baixar o pH da solução dos poros e/ou reduzir ou eliminar a formação de Ca(OH)_2 durante a hidratação do cimento Portland. As placas translúcidas feitas com CP II - Z e CP IV foram mantidas a intempérie. Os tempos e ambientes de exposição das placas feitas com CP V ARI RS foram detalhados no item 3.4.

Das placas com matriz cimentícia CP II-Z foram retiradas fibras com 520 dias de exposição; das placas com CP IV foram retiradas FOP com 360 dias de exposição e por ultimo, após os ensaios mecânicos, foram retiradas FOP com 120 dias de idade das placas com matriz cimentícia CP V ARI RS. A retirada das fibras foi feito manualmente. As fibras óticas foram analisadas mediante MEV e EIV.

Para um melhor acompanhamento dos resultados apresentados, no capítulo a seguir se apresenta um resumo do programa experimental para as placas de argamassa com e sem adição de FOP e para as fibras óticas poliméricas nas figuras 50 e 51, respectivamente.

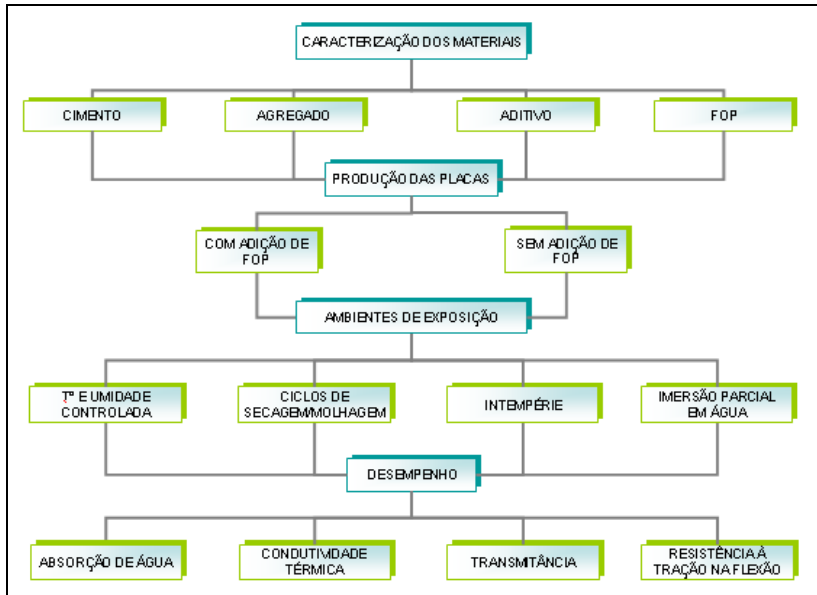


Figura 50 – Programa experimental para as placas de argamassa.

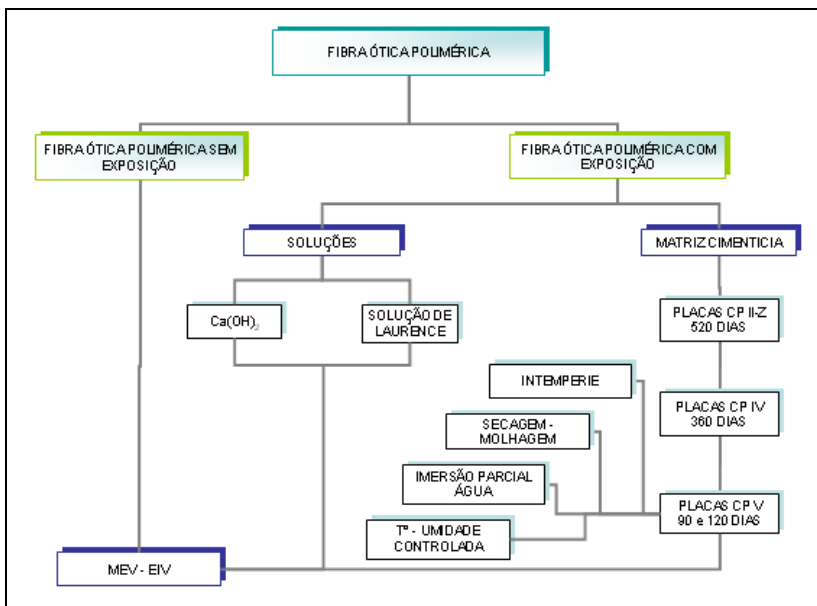


Figura 51 – Programa experimental para as FOP.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Avaliação da Exposição das Fibras Óticas Poliméricas em Soluções Agressivas

A microscopia eletrônica de varredura e a espectroscopia no infravermelho foram ferramentas fundamentais para analisar a FOP antes e depois da exposição aos ambientes agressivos. A seguir apresentam-se os resultados das imagens do MEV, os espectros do infravermelho e a absorção das FOP.

4.1.1 Absorção das FOP em Soluções Agressivas

A tabela 11 representa a massa seca, após 200hr na estufa a 50°C e a massa úmida das 10FOP depois de 120 dias de imersão em cada solução agressivas.

Tabela 11 – Massa seca e úmida das FOP em soluções agressivas após 120 de imersão.

FOP em Soluções	ms (g)	mu (g)
Lawrence (laboratório a 23°C)	0,0558	0,0557
Ca(OH) ₂ saturada (laboratório a 23°C)	0,0612	0,0613
Lawrence (estufa a 50°C)	0,0576	0,0578
Ca(OH) ₂ saturada (estufa a 50°C)	0,0594	0,0595

As FOP mantidas em solução de Lawrence a 23°C e 50°C apresentaram uma redução na massa de 0,18% e um incremento de 0,35%, respectivamente. As FOP mantidas em solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 apresentaram um aumento na sua massa de 0,16% e 0,17% a 25°C e 50°C respectivamente (figura 52). A variação da massa pode ser atribuída a incertezas de medição na balança. Isto significa que a FOP não apresentou absorção nem perdeu material, sendo resistente às soluções agressivas.

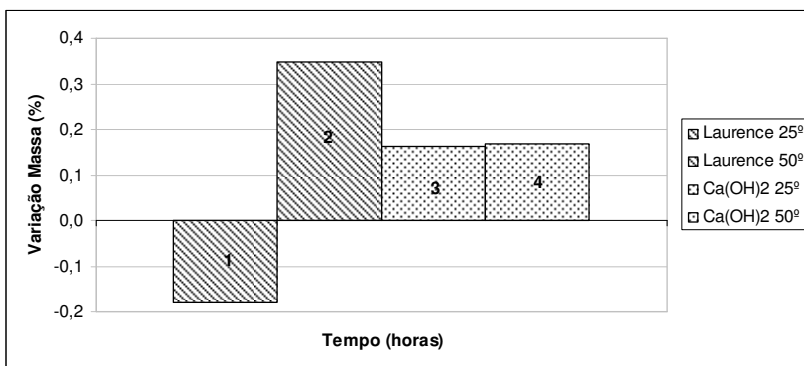


Figura 52 – Variação da massa em função do tempo das FOP imersas em soluções agressivas após 120 dias.

4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Depois de 120 dias de imersão em solução saturada de Ca(OH)_2 e solução de Lawrence a 25°C e 50°C, foi determinado o diâmetro das FOP representado nas figuras 53a, 54a, 55a e 56a com um aumento de X200. Já, com um aumento de X4000 observou-se um aspecto superficial liso das FOP representadas nas figuras 53b, 54b, 55b e 56b com alguns riscos presentes na superfície sendo similares aos identificados na FOP virgem (figura 28b).

Os riscos são atribuídos a defeitos de fabricação ou gerados por manuseio da fibra, mas não são características típicas de degradação que as soluções poderiam produzir.

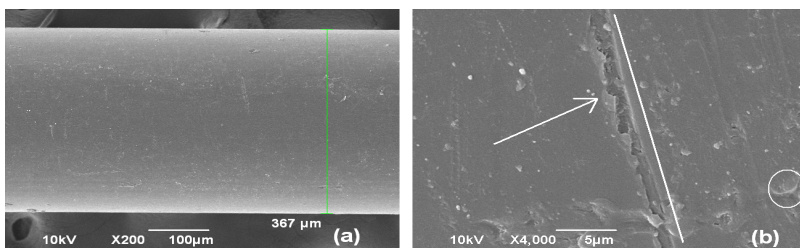


Figura 53 – Aspecto superficial da FOP mantidas em Ca(OH)_2 a 23°C durante 120 dias.

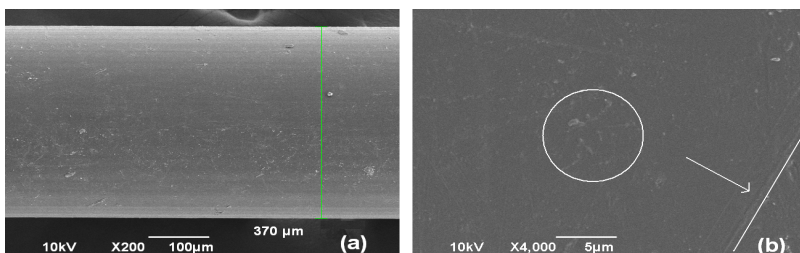


Figura 54 – Aspecto superficial da FOP mantidas em Ca(OH)_2 a 50°C durante 120 dias.

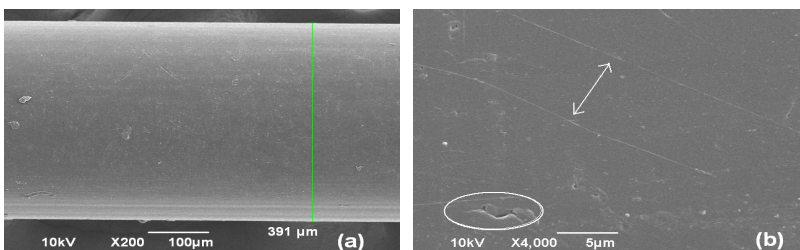


Figura 55 – Aspecto superficial da FOP mantidas em solução de Lawrence a 23°C durante 120 dias.

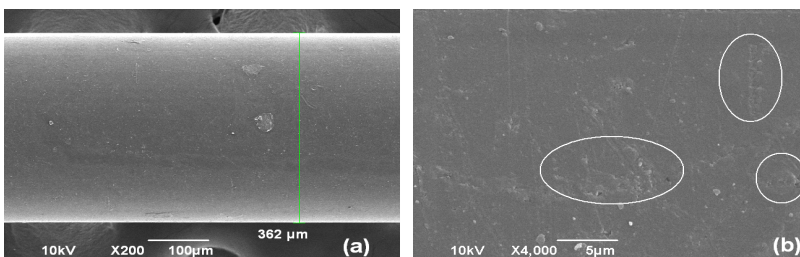


Figura 56 – Aspecto superficial da FOP mantidas em solução de Lawrence a 50°C durante 120 dias.

4.1.3 Espectroscopia no Infravermelho

Os espectros das FOP que foram imersas por 120 dias em solução de Lawrence e solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e mantidas na estufa a 50°C , são apresentados na figura 57. Comparando os espectros percebe-se que não apresentaram alterações, sendo idênticos entre eles, assim como ao espectro da FOP sem exposição (figura 36).

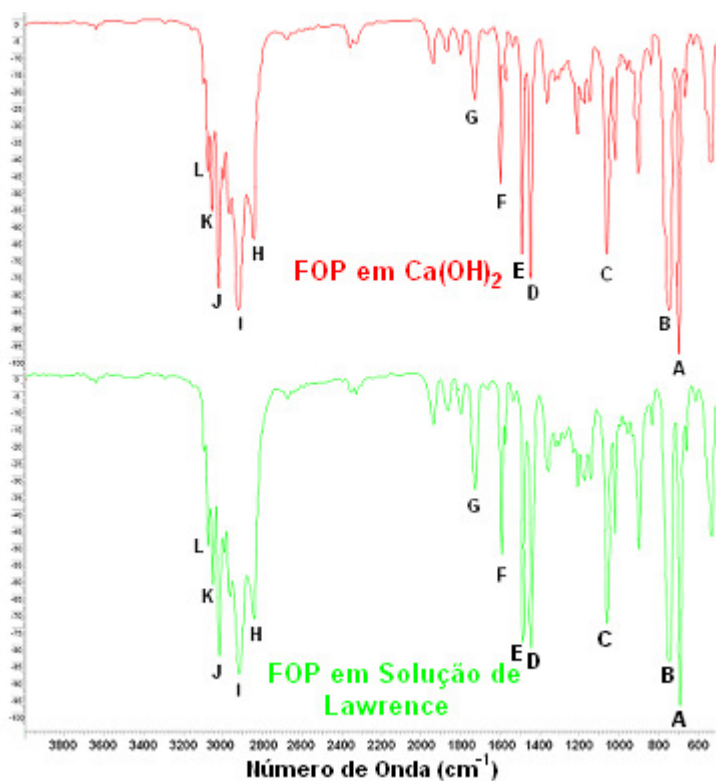


Figura 57 – Espectros das FOP expostas em Ca(OH)_2 e solução de Lawrence.

A tabela 12 registra as bandas dos espectros da figura 57. Observou-se, mediante comparação de números de onda, que as FOP não sofreram alterações na composição.

Os números de onda da tabela 12 são idênticos aos números de onda da FOP virgem (tabela 7) e aos apresentados por Leon (2008) no item 3.2.4.4.

Tabela 12 – Análise das bandas do espectro no infravermelho das FOP mantidas na estufa a 50°C.

Ponto	Bandas das FOP em Ca(OH)_2 (cm^{-1})	Bandas das FOP em Solução de Lawrence (cm^{-1})
A	700,11	700,11
B	757,00	757,00
C	1068,49	1068,49
D	1451,33	1451,33
E	1492,79	1492,79
F	1601,76	1601,76
G	1733,88	1733,88
H	2851,54	2851,54
I	2825,80	2924,83
J	3026,09	3026,09
K	3060,81	3059,84
L	3082,02	3082,02

O aspecto das FOP observado nas imagens apresentadas pelo MEV e os espectros obtidos das FOP por EIV mostram que a estrutura da fibra ótica polimérica não foi afetada pelas soluções agressivas ao longo do tempo.

4.2 Avaliação da Exposição das Fibras Óticas Poliméricas em Materiais a Base de Cimento

Inicialmente as FOP foram retiradas da matriz cimentícia e levadas para análise no MEV. As imagens obtidas deixaram em evidente os riscos na superfície das FOP (figura 58a), atribuídos ao desprendimento das fibras da matriz. Como alternativa, após os ensaios mecânicos se obteve fragmentos das placas translúcidas (figura 59) para analisar a superfície das FOP, tentando assim minimizar o dano provocado pelo desprendimento no revestimento da FOP.

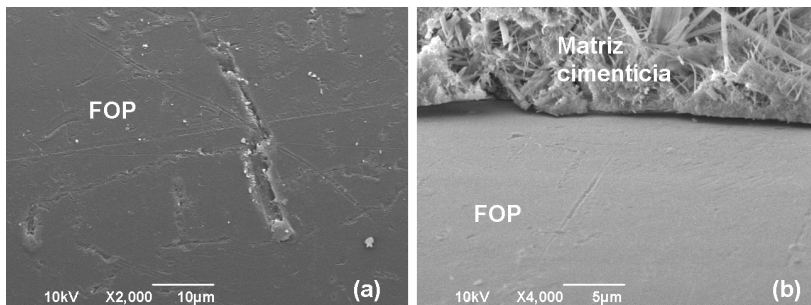


Figura 58 – (a) Superfície da FOP retirada da matriz cimentícia; (b) Superfície da FOP sem retirar da matriz.

Os fragmentos de argamassa com FOP foram analisados mediante MEV, seguindo a metodologia do item 3.2.4.1. Já para análise de EIV foram retiradas manualmente as FOP da matriz cimentícia.



Figura 59 – Fragmentos retirados das placas translúcidas e distribuição das fibras no seu interior.

Além da avaliação do aspecto superficial da FOP mediante microscopia eletrônica de varredura, foi possível analisar a microestrutura da argamassa e a interface FOP-Matriz (figura 58b). A seguir são apresentados os resultados.

4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

Em todas as imagens apresentadas neste item observou-se que não houve alteração da superfície da FOP após 120 dias de exposição na matriz cimentícia. Os riscos presentes em todas as fibras são similares aos riscos presentes na FOP virgem, sem exposição, mostrados na figura 28 e aos riscos das imagens das fibras em soluções agressivas do item 4.1.2.

Em todas as imagens foi possível apreciar os diversos produtos da reação que conformam a microestrutura em etapas avançadas de hidratação, identificando-se as estruturas de C-S-H (figura 61a e 67), que formam uma capa que se deposita sobre o C_3S , rodeado de agulhas de etringita que crescem nos seus poros (figura 64b), assim como cristais de CH (portlandita), encostando na FOP (figura 60a, 61a e 65b).

Algumas figuras apresentam riscos mais pronunciados como as figuras 61b e 62b, devido à separação dos fragmentos para análise. Acredita-se que a fricção que se produz ao introduzir as fibras óticas na argamassa possa ter aumentado a quantidade de riscos encontrados na superfície das FOP. As FOP que permaneceram 520 dias em matriz cimentícia CP II – Z são representadas pela figura 60.

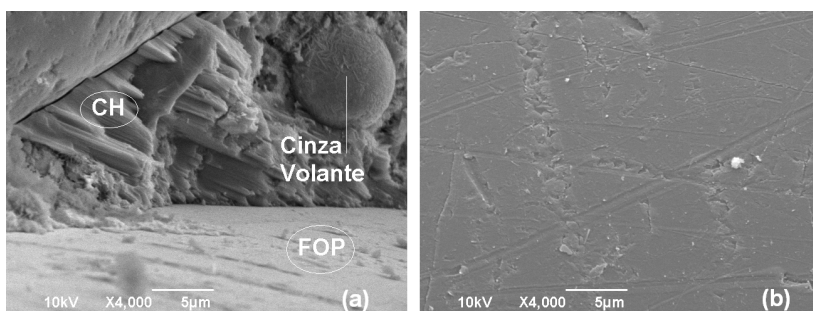


Figura 60 – FOP após exposição por 520 dias em matriz CP II mantida à intempérie.

A figura 61 representa uma parte dos fragmentos retirados das placas translúcidas que foram mantidas por 360 dias em matriz cimentícia CP IV à intempérie.

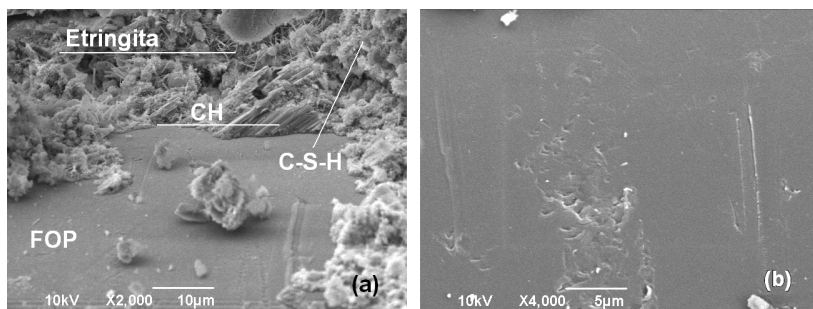


Figura 61 – FOP após exposição por 360 dias em matriz CP IV mantida à intempérie.

A figura 62 representa uma parte dos fragmentos retirados das placas translúcidas que foram mantidas por 120 dias na sala climatizada do LMCC.

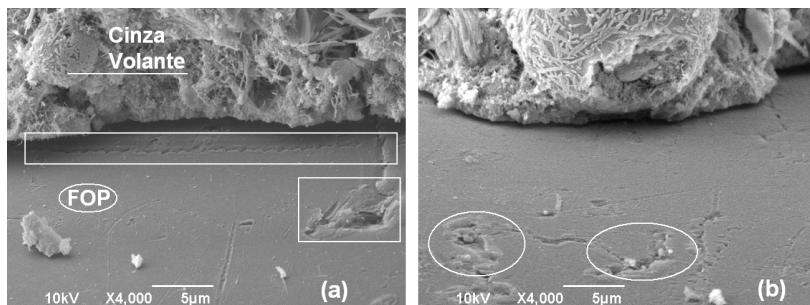


Figura 62 – FOP após exposição por 120 dias em matriz CP VI ARI RS mantida no laboratório.

A figura 63 mostra a cinza volante em idade avançada de hidratação. Mediante análise de espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) da cinza volante hidratada, foi possível a identificação de elementos como Mg, Al, Si, K e Ca.

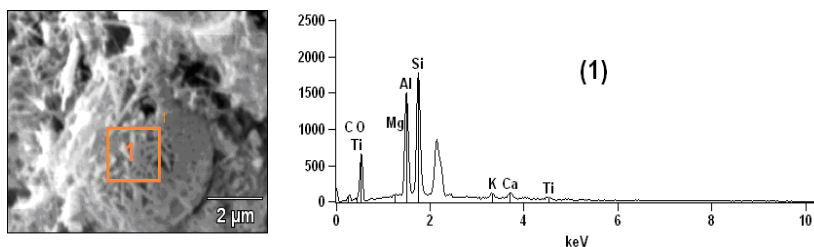


Figura 63 – EDS da cinza volante hidratada.

A figura 64 representa uma parte dos fragmentos retirados das placas translúcidas que permaneceram imersas parcialmente em água por 120 dias. Pode-se observar uma superfície lisa da FOP com riscos produto do desprendimento.

Na figura 64b é possível apreciar o preenchimento de um dos poros da matriz cimentícia mediante a formação de etringita.

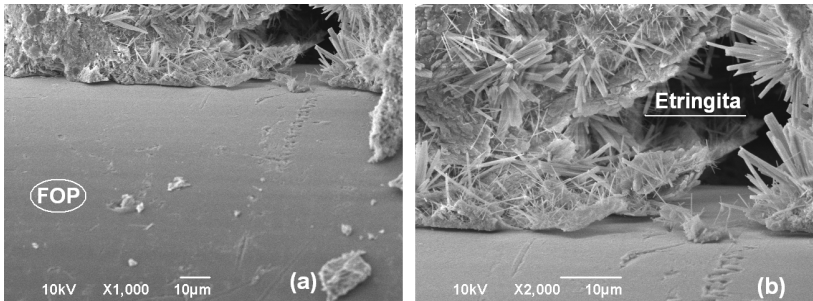


Figura 64 – FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida em imersão parcial em água.

A figura 65 representa uma parte dos fragmentos retirados das placas translúcidas mantidas por 120 dias no terraço.

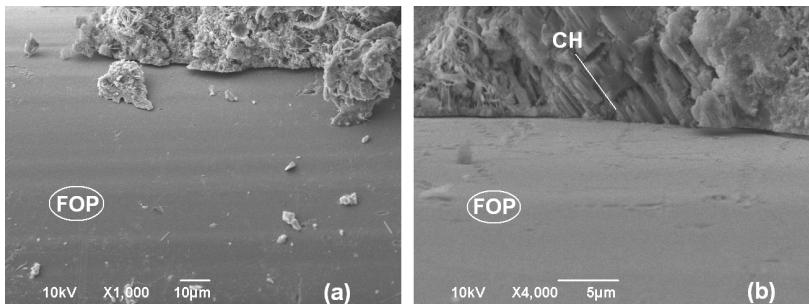


Figura 65 – FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida no terraço.

As figuras 66, 67 e 68 representam as FOP analisadas dos fragmentos obtidos das placas que permaneceram em ciclos de secagem/molhagem. Observou-se uma particularidade na superfície das FOP deste ambiente de exposição. Em algumas regiões a interface entre a matriz cimentícia e a fibra ótica polimérica ficou grudada à superfície das fibras.

A figura 66b apresenta rachaduras da interface devido às mudanças bruscas de temperatura durante o tempo de exposição. Estas rachaduras da interface podem diminuir a resistência à tração na flexão das placas translúcidas.

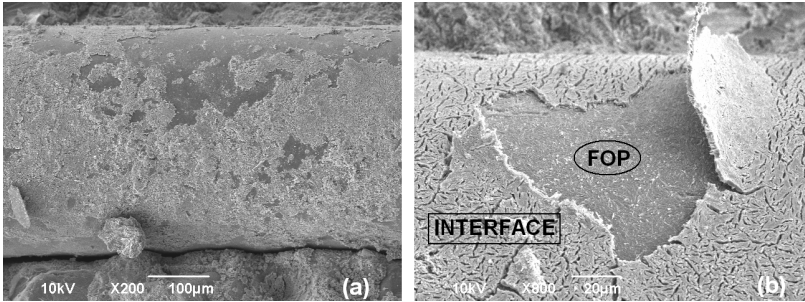


Figura 66 – Interface colada à superfície da FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida em ciclos de secagem/molhagem.

Observa-se na figura 67 o C-S-H que compõe a interface.

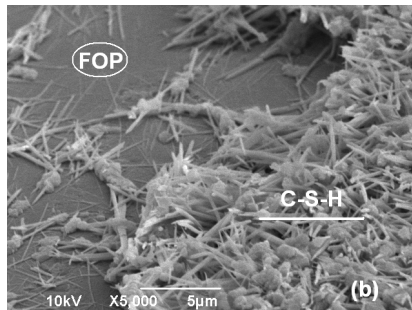


Figura 67 – Interface composta por C-S-H.

Em algumas regiões foi possível analisar a FOP como mostra a figura 68b. A superfície apresenta pequenos riscos, como já foi visto nas imagens anteriores, mas não tem sinais de degradação.

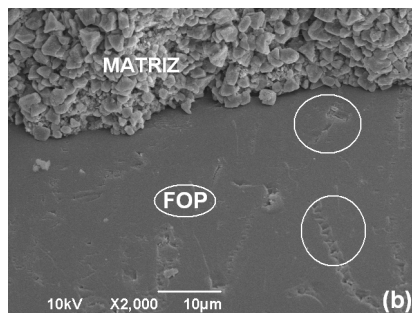


Figura 68 – Aspecto superficial da FOP após exposição por 120 dias em matriz CP V ARI RS mantida em ciclos de secagem/molhagem.

4.2.2 Espectroscopia no Infravermelho

No anexo B se apresentam os espectros das FOP que permaneceram por 520 dias na matriz de CP II-Z, 360 dias em CP IV e 120 dias em CP V ARI RS com diversos ambientes de exposição. Os espectros das FOP não apresentaram variação nos seus comprimentos de onda em relação ao espectro da FOP sem exposição (figura 36).

4.3 Avaliação do Desempenho das Placas Translúcidas

4.3.1 Absorção de Água por Imersão

Os valores da absorção encontram-se no anexo A.

Considerando que as pontas das FOP ficaram expostas nas faces das placas e em contato com a água, acreditava-se que por meio da interface fibra/matriz a água conseguisse entrar com maior facilidade nas placas e, portanto, houvesse uma maior absorção por parte das placas translúcidas. Depois de 8 dias de imersão em água observou-se o contrário. A adição de FOP na matriz cimentícia diminuiu o volume de argamassa nas placas (menos matriz porosa), portanto, diminuiu o teor de água absorvido, como pode ser observado na figura 69. As placas de argamassa sem adição de FOP apresentaram uma absorção de água de 6% maior, com relação às placas translúcidas.

Os valores individuais observados na figura 69 mostram que o teor de água absorvido pela placa (IV) sem adição de FOP foi 15,3% superior ao teor absorvido pela placa com adição de FOP (IV). A placa (II) apresenta um teor de água absorvido de 1,6% maior em relação à placa (II) com adição de FOP.

Considerando o item 4.1.1, onde os resultados mostraram que as FOP imersas em água, em solução de Lawrence e em solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), não apresentaram absorção, acredita-se que a presença delas na matriz cimentícia provavelmente tenha influenciado no menor teor de água absorvido por parte das placas translúcidas. A maior absorção de água apresentada pelas placas de argamassa sem adição de fibra ótica polimérica também pode ser atribuída ao aumento da porosidade aberta (acessível a água) em função da existência de alvéolos interligados (aumento da conectividade).

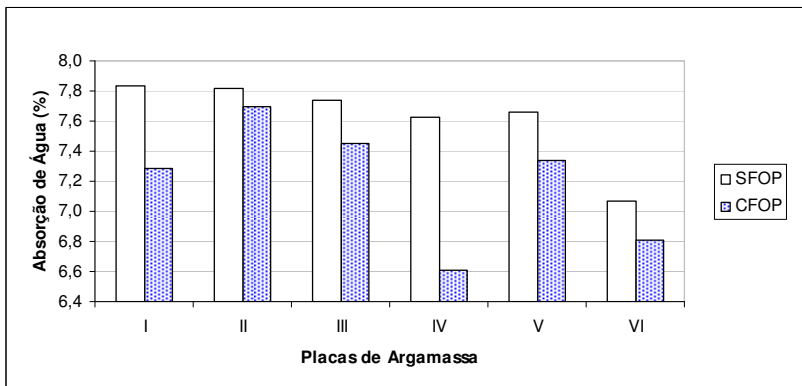


Figura 69 – Absorção de água das placas com adição e sem adição de FOP com 60 dias de idade.

As placas translúcidas foram expostas a ciclos de secagem/molhagem. A molhagem consistiu na imersão das placas em água por um período de 2 dias.

A figura 70 mostra a saturação das placas translúcidas antes da primeira leitura realizada 24 horas após sua imersão. Portanto, dois dias de imersão em água é suficiente para garantir a exposição da FOP. Entre 1 e 8 dias de imersão o teor médio de absorção de água apresentado pelas placas translúcidas foi de 4,4%.

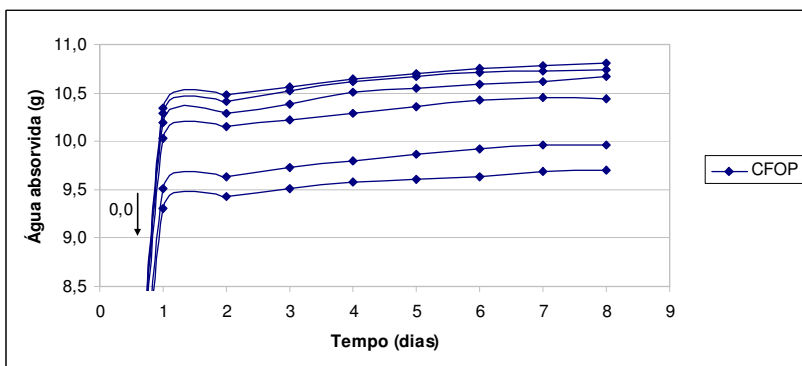


Figura 70 – Absorção de água de 6 placas translúcidas com 60 dias de idade.

4.3.2 Condutividade Térmica

A temperatura média do ensaio foi de 25°C e a incerteza da medição de 4%. As placas (1-CFOP e 2-CFOP), (3-CFOP e 4-CFOP) e a placa sem adição de FOP foram retiradas de corpos-de-prova diferentes. A produção das 5 placas foi realizada sob as mesmas condições, medindo a condutividade térmica aos 90 dias de idade.

Observa-se na figura 71 que as placas (1-CFOP), (2-CFOP) e (4-CFOP) apresentaram uma redução na condutividade térmica de 21,3%, 17,1% e 1,8% respectivamente, em relação à placa sem adição de FOP. Já, a placa (3-CFOP) apresentou um aumento de 7,3%. Se as placas translúcidas fossem aplicadas como painéis na separação de ambientes externos com internos, observa-se que não vão esquentar o ambiente interno.

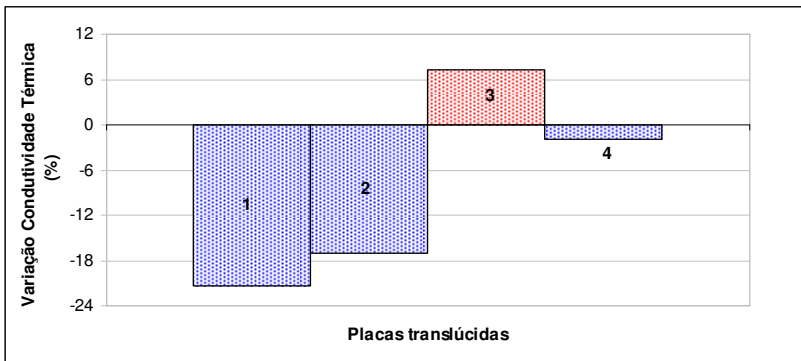


Figura 71 – Condutividade térmica de 4 placas translúcidas com dimensões (11,5X100X100)mm, com relação à placa sem FOP com λ (W/mK) = 1,64.

4.3.3 Transmitância

Os valores da transmitância das placas em ambientes de exposição ao longo do tempo apresentam-se no anexo E.

As legendas (Ambiente-0-60) e (Ambiente-0-90) apresentadas na figura 72 correspondem à transmitância inicial das placas, representada pelas marcas cheias. Já, as legendas (Ambiente-60) e (Ambiente-90) correspondem à transmitância final após 60 e 90 dias de exposição, respectivamente, representadas pelas marcas vazias. A incerteza da medição é de 3%.

As imagens obtidas do MEV permitiram avaliar o diâmetro de 30 amostras de FOP, que ficaram entre 348 e 411 μm , com um valor médio de 375 μm adotado como diâmetro para todas as FOP. Como mencionado no item 3.5.1, foi analisada uma área aproximada de 3,5 cm^2 no meio da placa translúcida. A quantidade de FOP nessa área foi contabilizada e calculou-se a média das FOP contadas em cada ambiente e idade. Já com os valores anteriores foi possível obter a área de FOP/ cm^2 por placa (anexo E).

Acreditava-se que uma maior quantidade de FOP/ cm^2 aumentasse a transmitância, deste modo, as placas (Água/Estufa-0-60) e (Imersão P-0-60) com 84 e 67 FOP/ cm^2 respectivamente, apresentaram um aumento na transmitância de 34,4% e 15,8% respectivamente, em relação à transmitância das placas (imersão P-0-90) com 77 FOP/ cm^2 , como mostra a figura 72. Percebe-se que não existe uma relação entre número de fibras e transmitância. Isto pode ser explicado pela figura 73. Um feixe de luz propagando-se pela FOP “A” atinge o sensor “S” do luxímetro com mais intensidade do que o feixe conduzido pela FOP “B” que apresenta uma inclinação, portanto, uma transmitância maior não vai depender só da quantidade de FOP presentes, também vai depender da inclinação delas, como observado na figura 59, obtida mediante MEV, dos fragmentos das placas.

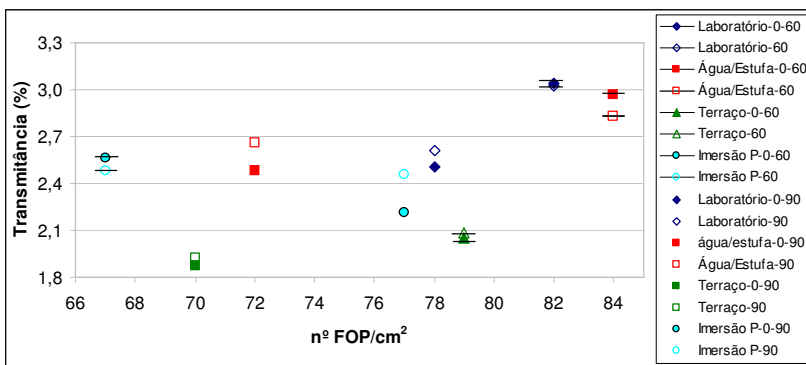


Figura 72 – Transmitância em função da quantidade de FOP/ cm^2 .

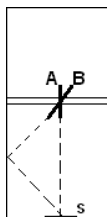


Figura 73 – Orientação das FOP no interior da matriz cimentícia e sua influência na transmitância.

A inclinação das fibras observada na figura 59 também explica o posicionamento escolhido, de forma experimental, da fonte de luz e do sensor do luxímetro na caixa preta antes das medições, conforme a figura 48.

Observou-se na figura 74 que as placas mantidas por 60 dias em Água/Estufa e Imersão Parcial apresentaram uma redução da transmitância de 4,8% e 3,3%, respectivamente, em relação às leituras iniciais. Considerando que houvesse lixiviação dos compostos do cimento que causassem o impedimento da entrada ou saída da luz nas fibras, os resultados anteriores eram esperados. No entanto, aos 90 dias de exposição em Água/Estufa e Imersão Parcial houve um aumento na transmitância de 7,1% e 11,2% respectivamente. As placas expostas no Laboratório apresentaram uma redução na transmitância de 0,4% e um aumento de 4,1% aos 60 e 90 dias respectivamente. As placas expostas no Terraço apresentaram um aumento na transmitância de 1,4% e 2,7% aos 60 e 90 dias respectivamente.

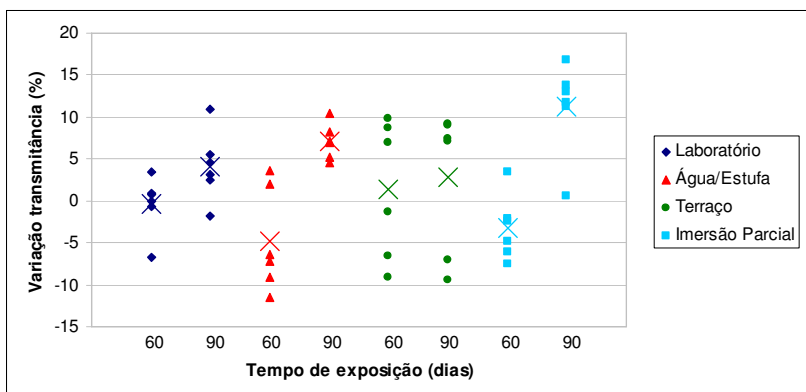


Figura 74 – Efeito da interação entre os tempos e ambientes de exposição na transmitância.

As variações apresentadas da transmitância mostram que a refletância interna da luz foi mantida, ou seja, o revestimento e a estrutura da FOP não foram afetados pelos ambientes agressivos aos quais foi submetida à placa.

No limite a transmissão deve se igualar à relação área de fibras/área total. Por exemplo, se usar uma placa perfurada, a transmitância será a relação de área dos furos pela área da placa. A não ser que os furos se tornem tão pequenos, da ordem do comprimento de onda, a relação é esta. Com as fibras a transmitância deve diminuir, pois estas ainda atrapalham a passagem da luz.

Na tabela 13 observa-se que a transmitância inicial analisada experimentalmente das placas que depois foram mantidas no laboratório é bem baixa. Acredita-se que os danos produzidos nas pontas das FOP ao realizar os cortes, como se observa nas figuras 75 y 76, tenha influenciado na entrada e saída da luz e, portanto, na baixa transmitância apresentada pelas placas translúcidas.

As transmitâncias das placas mantidas nos outros ambientes de exposição apresentaram o mesmo comportamento e encontram-se no anexo E, na tabela 32 e 33.

Tabela 13 – Transmitância inicial e Relação área de fibras/área total das placas sem exposição.

Área FOP (%) Área Placa	Transmitância inicial (%)
9,28	3,38
8,85	2,93
9,03	3,01
8,44	3,27
9,43	2,52
9,07	3,11
9,00	2,29
8,09	2,50
9,15	2,73
7,96	2,46
8,97	2,57
8,25	2,50

Ao realizar o corte transversal das FOP para serem introduzidas na argamassa o revestimento se descolou do núcleo, como se observa na

figura 75a. Uma vez introduzidas as FOP na argamassa e retirados os prismas do molde, foram retiradas as placas translúcidas efetuando cortes com serra. A figura 75b mostra a deformação das pontas da FOP gerada pela serra ao cortar os prismas.

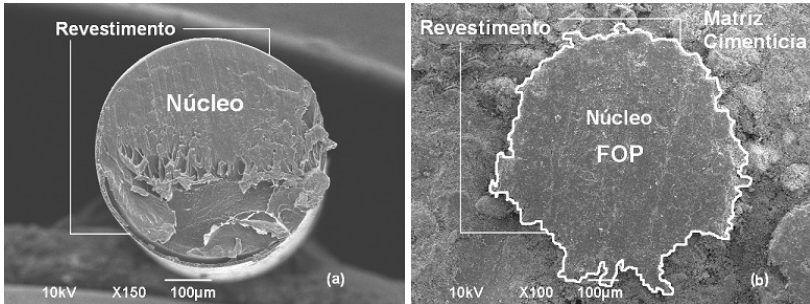


Figura 75 – (a) Revestimento da FOP descolado do núcleo pelo corte realizado com estilete; (b) Seção transversal deformada de uma FOP em matriz cimentícia cortada com serra.

A figura 76 mostra o esmagamento da FOP na ponta produzido pelo corte realizado com tesoura.

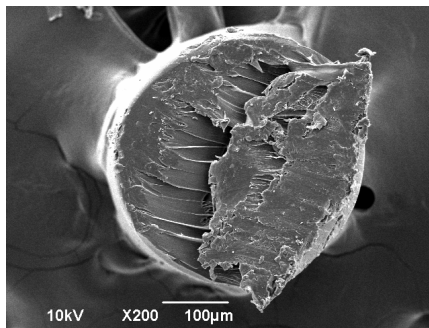


Figura 76 – Esmagamento do núcleo da FOP produzido pelo corte com tesoura.

4.3.4 resistência à Tração na Flexão

Os valores individuais e médios da influência dos tempos e ambientes de exposição e da adição de fibra ótica polimérica na resistência à tração na flexão e do módulo de elasticidade são apresentados no anexo C.

As figuras 77 e 78 mostram como a adição de FOP afetou a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade das placas de argamassa ao longo do tempo.

Aos 28 dias de idade as placas apresentaram uma diminuição na resistência à tração na flexão e no módulo de elasticidade de 69,8% e 25,4%, respectivamente, variação que pode ser explicada pela distribuição das FOP na matriz cimentícia, pois estas foram orientadas longitudinalmente à força aplicada na placa, portanto, fragilizando a matriz cimentícia. A variação da resistência e do módulo a 60 e 90 dias de exposição, pode ser observada na tabela 14 e 16.

Todos os ambientes de exposição afetaram a resistência e o módulo de elasticidade das placas de argamassa sem adição de FOP. Devido as mudanças bruscas de temperatura e umidade, como se esperava, o ambiente Água/Estufa foi o mais influente na resistência e no módulo das placas, apresentando uma diminuição de 36% e 63,8% respectivamente, aos 60 dias de exposição.

O ambiente imersão parcial foi o menos agressivo, apresentando uma diminuição de 0,5% na resistência e 33,4% no módulo aos 60 dias de exposição e, um aumento de 8,6% na resistência e uma diminuição no módulo de 27,3% aos 90 dias de exposição. A variação da resistência e do módulo das placas sem adição de FOP aos 60 e 90 dias de exposição em todos os ambientes pode ser observada na tabela 14 e 16, respectivamente.

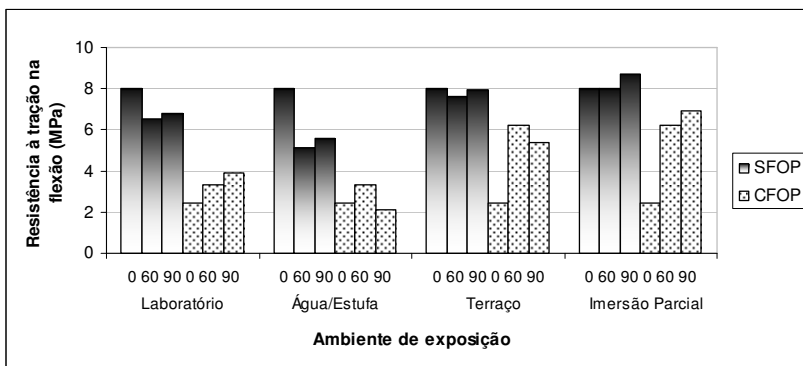


Figura 77 – Efeito da interação entre os ambientes de exposição e adição de FOP sobre a resistência à tração na flexão ao longo do tempo.

Tabela 14 – Variação da resistência à tração na flexão das placas influenciada pela adição de FOP ao longo do tempo.

Adição	Tempo Exposição (dias)	Variação da Resistência (%)			
		Laboratório	Água/ Estufa	Terraço	Imersão P.
FOP	0	-69,76	-69,76	-69,76	-69,76
	60	-49,03	-35,03	-18,56	-22,55
	90	-42,08	-61,68	-32,16	-20,59

(-): Diminuição da resistência com relação as placas sem FOP com o mesmo tempo de exposição.

Tabela 15 – Variação da resistência à tração na flexão das placas com e sem adição de FOP influenciada pelos ambientes de exposição ao longo do tempo.

Placas	Tempo Exposição (dias)	Variação da Resistência (%)			
		Laboratório	Água/ Estufa	Terraço	Imersão P.
SFOP	60	-18,98	-36,04	-4,86	-0,51
	90	-15,48	-30,47	-0,71	8,63
CFOP	60	36,57	37,44	156,25	154,84
	90	61,90	-11,88	122,77	185,27

(-): Diminuição da resistência com relação as placas sem exposição; SFOP: sem adição de FOP; CFOP: com adição de FOP.

As placas com adição de FOP apresentaram resistências superiores aos 60 e 90 dias de exposição em todos os ambientes em relação aos 28 dias de idade, já o módulo (figura 78), ao longo do tempo foi diminuindo. Aos 90 dias de exposição em imersão parcial se apresenta a maior variação na resistência à tração na flexão aumentando em 185,3% como pode ser observado na figura 77. Acredita-se que a aderência entre fibra/matriz cimentícia seja a responsável pelo aumento da resistência.

A exceção se apresentou nas placas com 90 dias de exposição no ambiente Água/Estufa, diminuindo sua resistência em 11,9%. Imagens do MEV mostraram como este ambiente, ao produzir mudanças bruscas de temperatura, gera rachaduras na interface fibra/matriz (figura 66b) que afeta a aderência da FOP diminuindo, portanto, a resistência.

A maior variação no módulo de elasticidade foi apresentada nas placas em Água/Estufa aos 60 dias de exposição, diminuindo em 60%; já, aos 60 dias de exposição em imersão parcial se apresentou a menor variação, diminuindo 45,7%.

A variação da resistência e do módulo das placas com adição de FOP aos 60 e 90 dias de exposição em todos os ambientes pode ser observada na tabela 15 e 17.

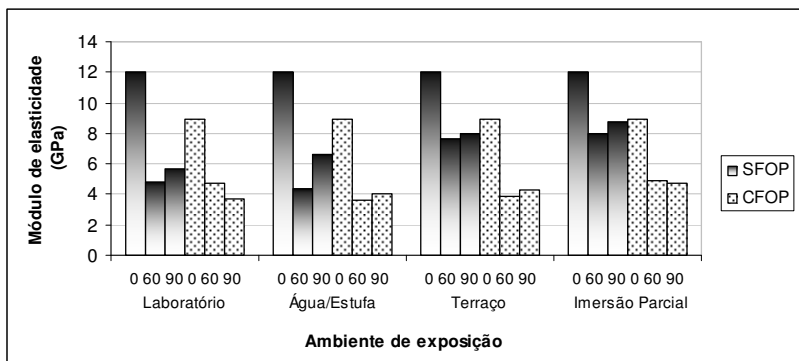


Figura 78 – Efeito da interação entre os ambientes de exposição e adição de FOP sobre o módulo de elasticidade ao longo do tempo.

Tabela 16 – Variação do módulo de elasticidade das placas influenciada pela adição de FOP ao longo do tempo.

Adição	Tempo Exposição (dias)	Variação do Módulo (%)			
		Laboratório	Água/Estufa	Terraço	Imersão P.
FOP	0	-25,42	-25,42	-25,42	-25,42
	60	-1,16	-17,85	-49,41	-38,95
	90	-35,55	-38,82	-45,80	-45,99

(-): Diminuição com relação as placas SFOP com mesmo tempo de exposição.

Tabela 17 – Variação do módulo de elasticidade das placas com e sem adição de FOP influenciada pelos ambientes de exposição ao longo do tempo.

Placas	Tempo Exposição (dias)	Variação do Módulo (%)			
		Laboratório	Água/Estufa	Terraço	Imersão P.
SFOP	60 dias	-59,84	-63,67	-36,28	-33,37
	90 dias	-52,54	-45,00	-33,51	-27,25
CFOP	60 dias	-46,77	-59,98	-56,78	-45,46
	90 dias	-58,98	-54,88	-51,68	-47,31

(-): Diminuição com relação as placas sem exposição.

Os valores individuais e médios da quantidade de FOP/cm² na região esperada de ruptura da placa são apresentados no anexo E.

Devido à orientação das FOP na matriz cimentícia, acreditava-se que, aumentando a quantidade de FOP na região de ruptura diminuísse a resistência à tração na flexão.

Observou-se na figura 79 que as placas mantidas durante 60 dias no terraço e em imersão parcial não variaram sua resistência (0%), apresentando uma diferença de 79 FOP/cm² e 67 FOP/cm² respectivamente.

Nas placas expostas nos mesmo ambientes por 90 dias apresentaram um aumento na resistência de 27,8% com uma quantidade 70 FOP/cm² e 77 FOP/cm² respectivamente. Este comportamento se observou em todas as placas, mostrando que não existe uma relação lógica entre quantidade de FOP adicionada e a resistência. Na deformação se apresentou o mesmo comportamento.

A figura 59 mostra como são posicionadas as FOP na matriz, portanto, acredita-se que a inclinação das FOP na região de ruptura possa ter influenciado na variação da resistência e da deformação das placas apresentada nas figuras 79 e 80 respectivamente.

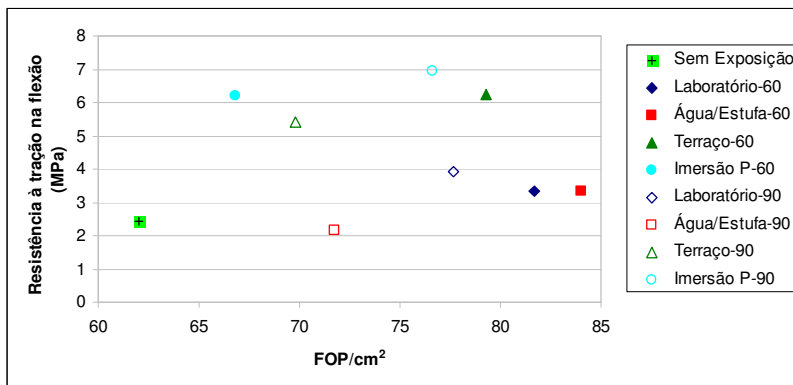


Figura 79 – Influência da quantidade de FOP/cm² na resistência à tração na flexão das placas translúcidas.

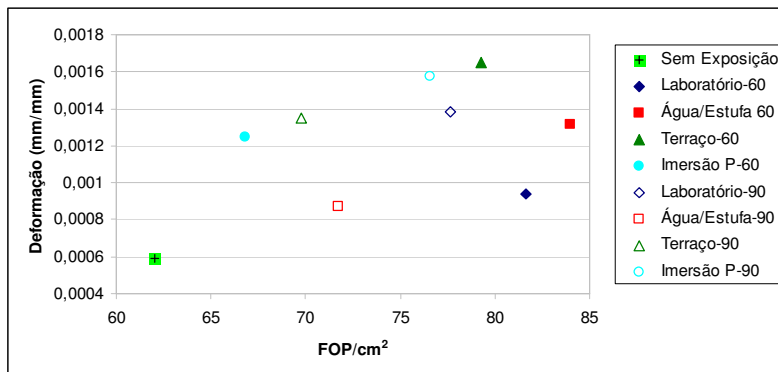


Figura 80 – Influência da quantidade de FOP/cm² na deformação das placas translúcidas.

Nas curvas tensão vs deformação apresentadas no anexo D, observa-se que as placas sem adição de FOP rompem repentinamente quando a deformação correspondente à resistência à tração na flexão última é superada; por outro lado, o concreto reforçado com FOP continua a resistir cargas.

Para a análise estatística realizada por análise de variâncias (ANOVA) foram utilizadas 72 placas de argamassa, 36 com adição de FOP e 36 sem adição de FOP. Na tabela 18 observou-se que a adição de FOP, os tempos e ambientes de exposição são fatores estatisticamente significativos na resistência à tração na flexão das placas de argamassa.

Tabela 18 – Valores de análise de variância para os ensaios de resistência a tração na flexão.

FONTE	Soma dos Quadrados	Graus de Lib.	Média dos Quadrados	F	Fa(v1,v2)	
I	214,27	1	214,27	672,89	F 0,05(1,48)	4,05
II	60,18	3	20,06	63,00	F0,05(3,48)	2,81
III	14,40	2	7,20	22,61	F0,05(2,48)	3,19
I-II	2,81	3	0,94	2,94	F0,05(3,48)	2,81
II-III	32,87	6	5,48	17,20	F0,05(6,48)	2,31
I-III	57,81	2	28,91	90,78	F0,05(2,48)	3,19
I-II-III	4,37	6	0,73	2,29	F0,05(6,48)	2,31
Resíduo	15,28	48	0,32			
TOTAL	402,01	71				

I:Placas CFOP e SFOP; II:Ambiente de exposição; III:Tempo de Exposição.

A adição de FOP e o tempo de exposição foram estatisticamente significativos no módulo de elasticidade, no entanto, o ambiente de exposição não apresentou uma influencia estatisticamente significativa.

Tabela 19 – Valores de análise de variância para o módulo de elasticidade.

FONTE	Soma dos Quadrados	Graus de Lib.	Média dos Quadrados	F	Fa(v1,v2)	
I	99,97	1	99,97	161,55	F _{0,05} (1,48)	4,05
II	1,43	3	0,48	0,77	F _{0,05} (3,48)	2,81
III	389,62	2	194,81	314,82	F _{0,05} (2,48)	3,19
I-II	3,03	3	1,01	1,63	F _{0,05} (3,48)	2,81
II-III	7,47	6	1,25	2,01	F _{0,05} (6,48)	2,31
I-III	44,87	2	22,43	36,25	F _{0,05} (2,48)	3,19
I-II-III	8,51	6	1,42	2,29	F _{0,05} (6,48)	2,31
Resíduo	29,70	48	0,62			
TOTAL	584,60	71				

I: Placas CFOP e SFOP; II: Ambiente de exposição; III: Tempo de Exposição.

Os tempos e exposição foram estatisticamente significativos na deformação das placas de argamassa com e sem adição de fibra ótica polimérica.

Tabela 20 – Valores de análise de variância para a deformação.

FONTE	Soma dos Quadrados	Graus de Lib.	Média dos Quadrados	F	Fa(v1,v2)	
I	0,0000000	1	0,0000000	0,09	F _{0,05} (1,48)	4,05
II	0,0000008	3	0,0000003	6,15	F _{0,05} (3,48)	2,81
III	0,0000049	2	0,0000025	55,15	F _{0,05} (2,48)	3,19
I-II	0,0000000	3	0,0000000	0,28	F _{0,05} (3,48)	2,81
II-III	0,0000013	6	0,0000002	4,74	F _{0,05} (6,48)	2,31
I-III	0,0000011	2	0,0000005	12,04	F _{0,05} (2,48)	3,19
I-II-III	0,0000011	6	0,0000002	4,12	F _{0,05} (6,48)	2,31
Resíduo	0,0000021	48	0,0000000			
TOTAL	0,0000114	71				

I: Placas com e sem FOP; II: Ambiente de exposição; III: Tempo de Exposição

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

As imagens obtidas mediante microscopia eletrônica de varredura e os espectros do infravermelho mostraram que as fibras óticas plásticas utilizadas na pesquisa são resistentes às soluções agressivas como Ca(OH)_2 saturada e solução de Lawrence. As fibras também se mostraram resistentes aos métodos adotados de envelhecimento acelerado.

Fibras expostas a temperaturas e umidades diferentes em ambientes alcalinos ao longo do tempo não apresentaram sinais de degradação na superfície nem variabilidade na cadeia do polímero. Os espectros de infravermelho mostram que os comprimentos de onda mantiveram-se iguais para todas as FOP com e sem exposição em ambientes agressivos.

Os riscos identificados nas superfícies das fibras óticas plásticas atribuem-se a defeitos de fabricação ou manuseio da fibra. Também pode ser uma consequência do retiro das fibras da matriz cimentícia ou riscos gerados quando introduzidas nos blocos de argamassa na moldagem dos corpos de prova.

As fibras óticas poliméricas imersas em água, em solução de Lawrence e em solução saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) não apresentaram absorção de água, por tanto, a presença delas na matriz cimentícia influenciou no menor teor de água absorvido pelas placas translúcidas quando comparadas com as placas sem FOP.

A adição de FOP na matriz cimentícia diminui o volume de argamassa nas placas, portanto, diminui o teor de água absorvido apresentado pelas placas translúcidas.

As placas de argamassa translúcida apresentaram menor condutividade térmica do que as placas sem adição de fibra ótica polimérica.

Foi possível conduzir a luz através de uma placa de argamassa introduzindo fibras óticas plásticas de poliestireno (PS) na sua matriz. Devido ao esmagamento das pontas da FOP realizado pelos cortes a transmitância apresentada foi baixa. O esmagamento acabou

atrapalhando a entrada e saída da luz. Os ambientes de exposição não afetaram a estrutura do polímero ao longo do tempo. Portanto, a condução de luz através das placas de argamassa não foi afetada.

A adição de FOP diminuiu a resistência à tração na flexão das placas de argamassa devido ao posicionamento delas na matriz, já que a carga é aplicada no sentido longitudinal às fibras. Nem todas as FOP ficaram em posição transversal às faces das placas de argamassa, por tanto, esse declive das fibras junto com a boa aderência na matriz cimentícia ajudaram no aumento da resistência a tração na flexão entre placas translúcidas ao longo do tempo.

Foi possível identificar os diversos produtos da reação que conformam a microestrutura em etapas avançadas de hidratação, como as estruturas de C-S-H que formam uma capa que se deposita sobre o C_3S , rodeado de agulhas de etringita que crescem nos seus poros assim como cristais de CH (portlandita) encostando-se à FOP.

As propriedades estudadas permitem a produção de placas de argamassa translúcida para aplicações em vedações verticais ou painéis decorativos.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Com o intuito de dar continuidade ao estudo da argamassa translúcida, sugere-se para trabalhos futuros:

- Adicionar menor teor de FOP na matriz cimentícia e avaliar o comportamento mecânico;
- A avaliação da durabilidade das fibras óticas poliméricas, expostas em matriz cimentícia, por ciclos de exposição mais longos;
- A realização de testes de aderência da FOP na matriz cimentícia;
- A avaliação da expansão térmica da placa translúcida;
- A realização de um método de corte que não danifique as pontas da FOP;
- A avaliação do efeito do corte das FOP na entrada e saída da luz.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. **Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil nos Países em Desenvolvimento: O Uso das Fibras Vegetais.** Tese (Livre Docência). EPUSP, São Paulo. 1991.

_____. **O emprego de materiais fibrosos na construção civil.** In: Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo 1993.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr., H. **Uso de materiais alternativos a base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira.** In: Seminario Iberoamericano de materiales fibroreforzados, 1., y reunión proyecto PIP VIII.5 Cyted, 3., Cali. Universidad del Valle, Colombia, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R.** (1996) **Report on fiber reinforced concrete.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT - NBR 7211.** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro 2005.

_____. **ABNT - NBR 9778.** Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro 2005.

_____. **ABNT - NBR 12142.** Concreto – Determinação da resistência a tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro 1991.

_____. **ABNT - NBR 13279.** Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos–Determinação da resistência a tração na flexão e a compressão. Rio de Janeiro 2005.

_____. **ABNT. Projeto 02:135.07-005.** Desempenho térmico de edificações – Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico. Rio de Janeiro 1998.

_____. **ABNT - Projeto 18:316.01-002/5.** Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibra de vidro – Método de ensaio – Parte 5: Medição da resistência a flexão, método “Ensaio completo de flexão”. Rio de Janeiro 2004.

_____. **ABNT - Projeto 18:316.01-002/6.** Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibra de vidro – Método de ensaio – Parte 6: Determinação da absorção de água por imersão e da massa unitária seca. Rio de Janeiro 2004.

ASSOCIAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND. **Architectural & Decorative Concrete.** Disponível em: <<http://www.cement.org/decorative/translucent.asp> >. Acesso em: Novembro 2009.

APPAJIAH, A. **Climatic Stability of Polymer Optical Fibers (POF).** Dissertationsreihe (Doktor - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) Universität Potsdam eingereichte, Berlin 2004.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Mechanics of fibre reinforced cementitious composites.** London. Elsever. 1990. Pág. 89-131.

BETIOLI, A. M. **Degradação de fibras de PET em materiais a base de cimento portland.** 2003. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BUDINSKI, K. G. **Engineering Materials;** properties and selection. New Jersey: Prentice Hall International., 5ª ed, 653 p. 1996.

CARPENA, D. **Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura.** Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Capítulo 14, pag. 403-436. 2007.

DOWNING, N.J. Fiber-Optic Communications. 345 p. 2005.

HANNANT, D.J. Fiber-reinforced cements and concretes. **Construction Materials**; their nature and behavior. 2ª ed. London. P.359-403. 1994.

ISAIA, G. C. **O Concreto: Da Era Clássica à Contemporânea**. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. Universidade Federal de Santa Maria. Capítulo 1, Pág. 1 – 43. 2005.

JELIDI, A. **Conception d'un materiau composite a matrice cimentaire renforcee par des fibres de polyester**. 1991. 170f.. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais)-Devant L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, França.

JOHN, V. M.; GLEIZE, P. J. P. **Materiais de Construção: Perspectivas e Desafios futuros**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Engenharia de Materiais, Volume 2, Pág 1687 – 1697. 2007

JOHNSTON, C.D. Fiber-reinforced cement and concrete. In: V. M. MALHORTA. Advances in concrete technology. 2ª edição. Ottawa. 1994. p. 603-673.

LEON, A. Y.; SALAZAR, R. **Síntesis and Characterization of the Polystyrene – Asphaltene Graft Copolymer by FT-IR Spectroscopy**. CT&F – Ciencia, Tecnologia y Futuro – Scielo 2008.

LITRACON – Light Transmitting Concrete. Disponível internet via: www.litracon.hu Dezembro 2009.

LOPES, M. M. (2005) **Substituição parcial de armaduras de flexão em vigas de concreto**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

MARTINS, W. M. **Pesquisa e desenvolvimento em fibras óticas plásticas no laboratório de instrumentação e fotônica**. Laboratório de instrumentação e fotônica. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Junho 2007

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008. 674p.

NEWMAN, J.; Ban S. C. *Advanced Concrete Technology-Processes*. 1.ed. London 2003.

NICOLAU, V. P.; POSSAMAI, T. S. Medição de Refletividades Espectrais usando uma esfera de integração. **Brazil Soc. of Mechanical Sciences and Engineering - ABCM**, Curitiba, Brazil, 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering Dec. 5-8, 2006.

PERUZZI, A. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa**. 2002. 111p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Carlos.

RAMESH, S.; LEEN, K. H.; KUMUTHA, K.; AROF, A.K. “FTIR studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes.” **Elsiever - Spectrochimica Acta Part A** 66 (2007) 1237-1242.

PAULON, V. A. **A Microestrutura do Concreto Convencional**. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. Capítulo 19, pag. 583 – 604. 2005.

REPETTE, W. L. **Concretos de Última Geração: Presente e Futuro**. CONCRETO. Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol. 2. Capítulo 49. 2005.

RODRIGUES, A. **Avaliação do Comportamento de Vigas de Concreto Auto-Adensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.

SAVASTANO, H. **Materiais a base de Cimento Reforçado com Fibra Vegetal: Reciclagem de Resíduos para a Construção de Baixo Custo**. Tesse – Concurso de livre-Docência, Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da USP. 2002 152p.

SEGRE, N. C. *Avaliação da Estabilidade de Fibras de Polipropileno em Meios Agressivos aos Materiais a Base de Cimento*. Dissertação de

mestrado, Instituto de Química. Universidade Estadual de Campinas. 1995. 80p.

STERLING, J.D.; Technician's Guide to Fiber Optics. 4th Edition, 345 p. 2004

TAYLOR, G.D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2^aed, 284p. 1994.

VASCONCELOS, A.C; ISAIA, G.C. **Restrospectiva do Concreto no Brasil**. CONCRETO – Ensino, Pesquisa e Relações, pág. 45 – 74, 2005.

WANG Y.; BACKER S.; LI V. C. An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites. **Journal of Materials Science**. V. 22, p. 4281-4291. 1987.

ZUBIA, J.; ARRUE, J. **Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications**. Optical Fiber Technology 7, 101-140 (2001).

ANEXO A – Absorção de Água por Imersão

Tabela 21 – Valores obtidos da absorção de água por imersão das placas de argamassa com e sem adição de FOP.

Corpos de prova		Dimensões (cm)			Volume (cm ³)	Massa Úmida (g)	Massa seca (g)	Absorção de água (%)	Massa unitária Seca (g/cm ³)	Média
		B	h	e						
Placas Sem Fibra	I	16	4	1	83,3	153,38	142,23	7,83	1,71	7,63
	II				90,1	164,66	152,72	7,82	1,70	
	III				82,6	152,87	141,88	7,74	1,72	
	IV				87,6	161,05	149,64	7,62	1,71	
	V				85,6	156,28	145,15	7,66	1,70	
	VI				79,4	149,56	139,69	7,07	1,76	
Placas Com Fibra	I	16	4	1	84,4	153,75	143,31	7,29	1,70	7,20
	II				82,8	151,17	140,37	7,70	1,70	
	III				85	154,86	144,12	7,45	1,70	
	IV				86,3	156,41	146,71	6,61	1,70	
	V				86	156,01	145,34	7,34	1,69	
	VI				86,8	156,31	146,34	6,81	1,69	
v : volume determinado pelo método da balança hidrostática										

Tabela 22 – Teor de absorção de água das placas translúcidas.

Placas	0 hr	24 hr	48 hr	72 hr	96 hr	120 hr	144 hr	168 hr	192 hr	Teor (%)	Média (%)
I	0	7,00	7,09	7,13	7,18	7,23	7,27	7,30	7,29	4,18	4,43
II	0	7,37	7,46	7,52	7,58	7,62	7,66	7,68	7,70	4,44	
III	0	7,14	7,23	7,30	7,36	7,40	7,43	7,44	7,45	4,43	
IV	0	6,34	6,43	6,49	6,53	6,54	6,57	6,60	6,61	4,21	
V	0	7,01	7,08	7,15	7,23	7,26	7,28	7,30	7,34	4,63	
VI	0	6,50	6,58	6,65	6,70	6,74	6,78	6,81	6,81	4,72	

ANEXO B – Espectros das Fibras Óticas Poliméricas

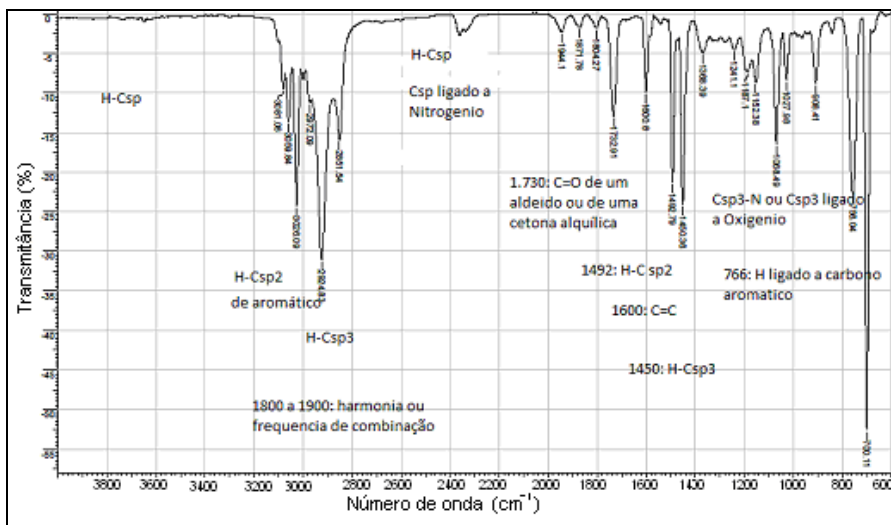
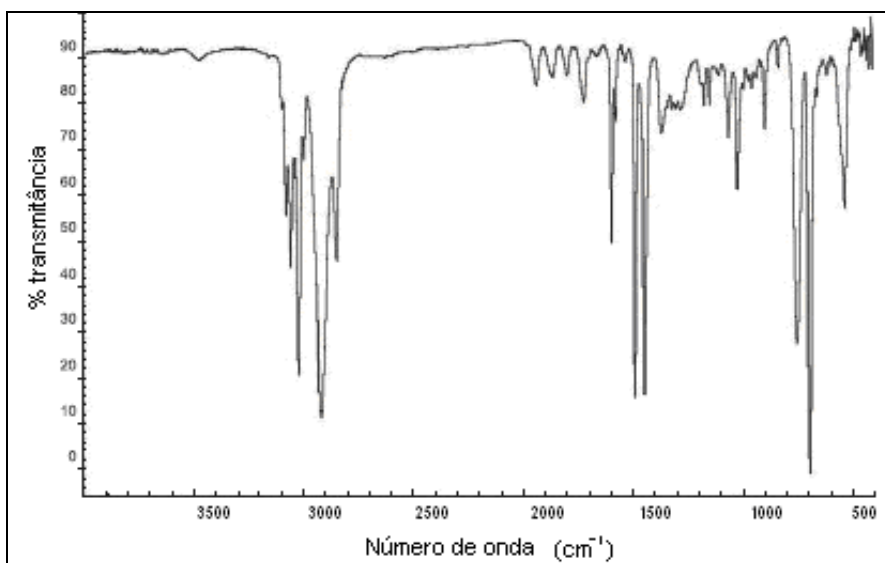


Figura 81 – EIV das FOP sem exposição.

Figura 82 – EIV do Poliestireno (PS).
Leon, 2008.

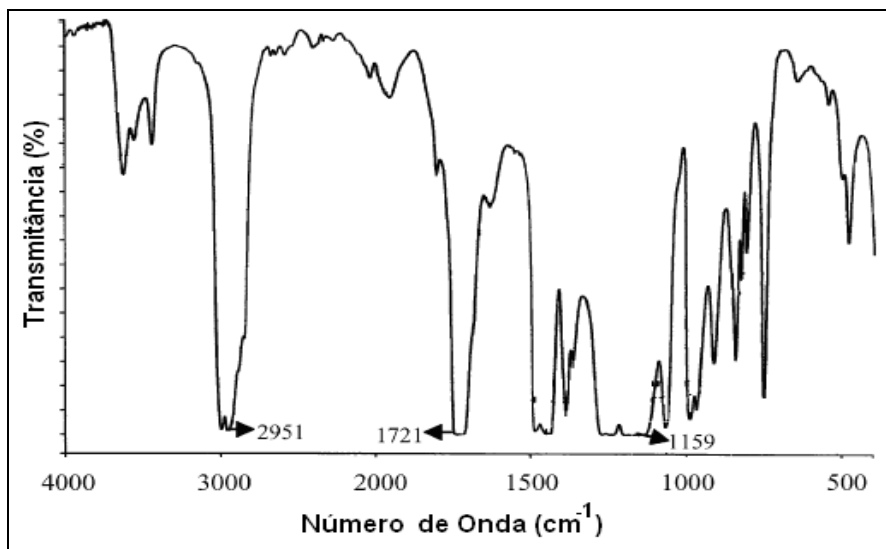


Figura 83 – EIV do Polimetilmetacrilato (PMMA).
Ramesh, 2007.

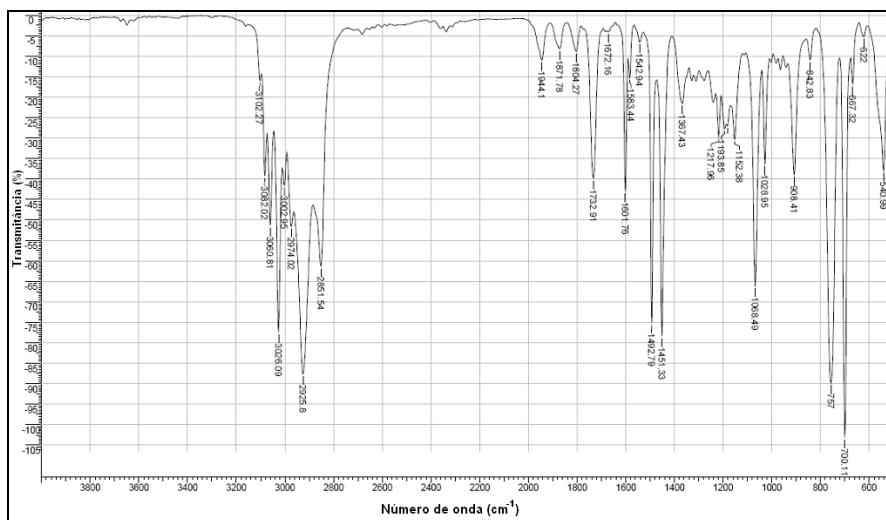


Figura 84 – EIV das FOP após 520 dias de exposição em matriz cimentícia CP II-Z.

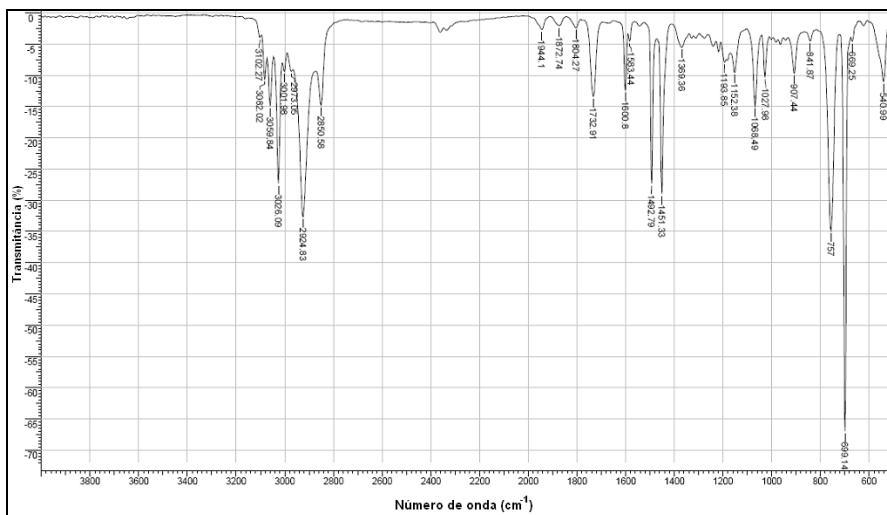


Figura 85 – EIV das FOP após 360 dias de exposição em matriz cimentícia CP IV.

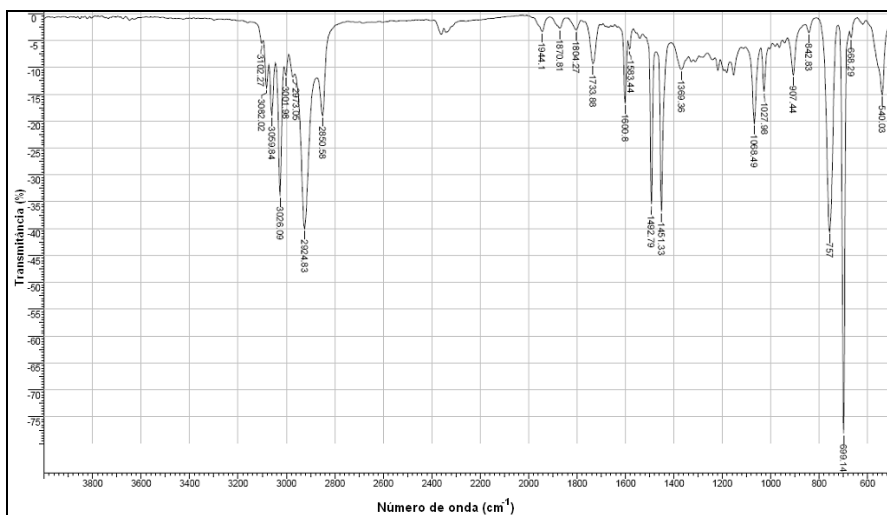


Figura 86 – EIV das FOP após 120 dias de exposição em matriz cimentícia CP V ARI RS e 90 dias em ciclos de secagem/molhagem.

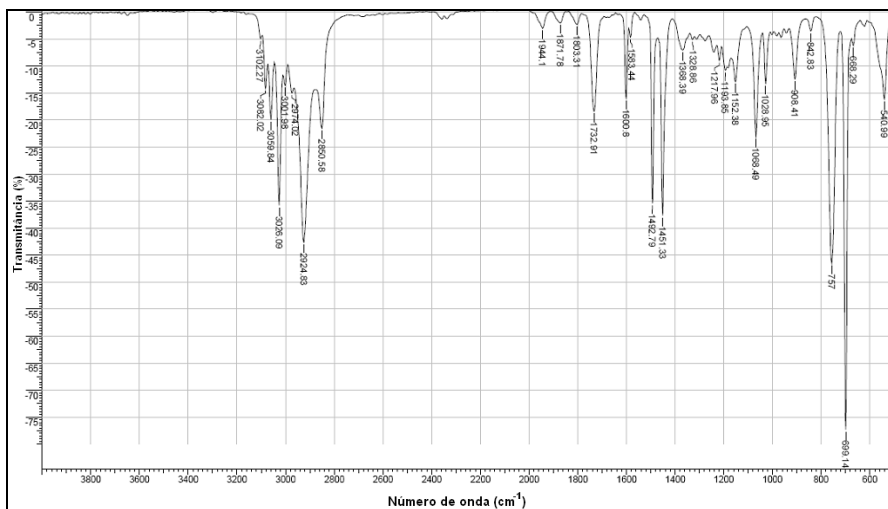


Figura 87 – EIV das FOP após 120 dias de exposição em matriz cimentícia CP V ARI RS e 90 dias de Imersão Parcial.

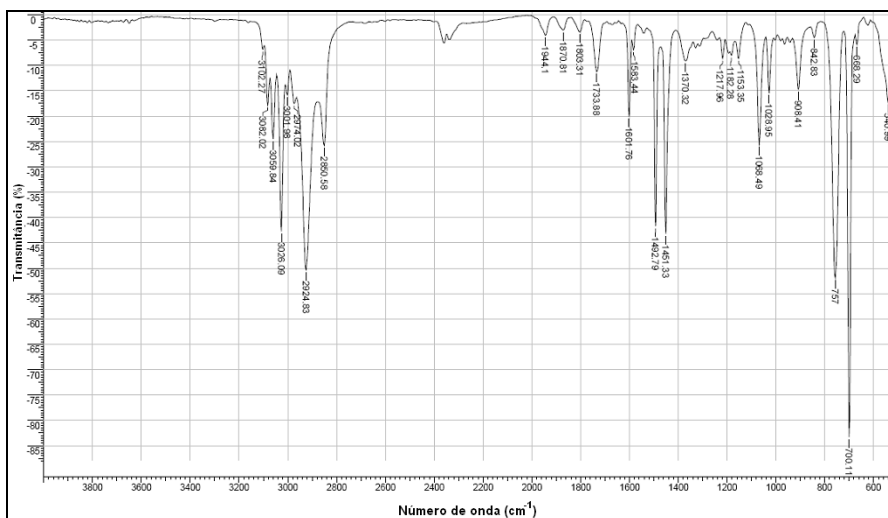


Figura 88 – EIV das FOP após 120 dias de exposição em matriz cimentícia CP V ARI RS e 90 dias no laboratório.

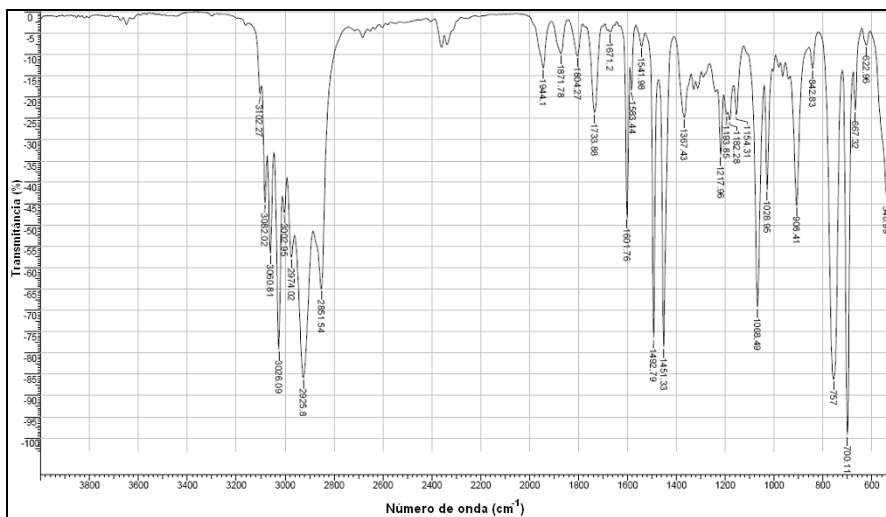


Figura 89 – EIV das FOP após 90 dias de exposição em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 50°C.

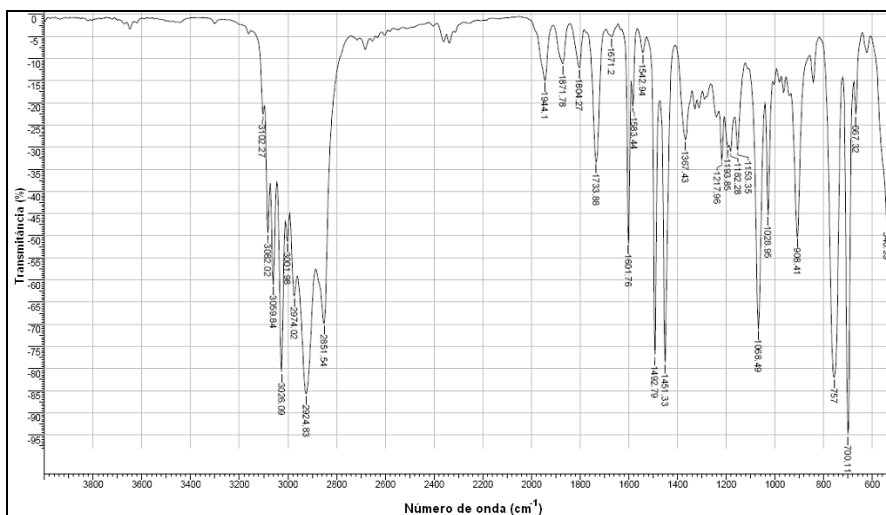


Figura 90 – EIV das FOP após 90 dias de exposição solução de Lawrence a 50°C.

ANEXO C – Resistência à Tração na Flexão e Módulo de Elasticidade

Tabela 24 – Resistência à tração na flexão e Módulo de elasticidade das placas expostas em Água/Estufa.

Ambiente	Tempo Exposição (dias)	Idade (dias)	Adição de FOP (%)	Res. Tração na flexão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia. (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia. (%)
ÁGUA / ESTUFA	0	28	0%	8,780	8,04	2,46	30,55	11,41	12,00	3,00	25,00
				7,490				12,14			
				7,840				12,45			
			2,5%	2,387				8,55			
				3,491				8,20			
				1,203	2,43	1,71	70,30	13,31	8,95	3,28	36,62
				3,715				9,44			
				1,870				7,16			
				1,902				7,03			
				4,642				5,71			
				5,328	5,14	1,96	38,20	3,52	4,36	1,81	41,48
				5,451				3,86			
				3,550				3,72			
	60	90	2,5%	3,025	3,34	2,00	59,94	1,86	3,58	2,07	57,89
				3,721				3,17			
				3,890				4,27			
			0%	3,416				4,13			
				2,436				4,34			
				5,610	5,59	2,05	36,64	6,88	6,60	2,22	33,71
				5,375				6,74			
				5,776				6,19			
				2,857				3,84			
				2,496				4,64			
				1,563	2,14	1,60	74,86	3,57	4,04	2,20	54,51
				2,211				3,74			
				1,668				4,08			
				2,064				4,35			

Tabela 25 – Resistência à tração na flexão e Módulo de elasticidade das placas expostas à intempérie no terraço.

Ambiente	Tempo Exposição (dias)	Idade (dias)	Adição de FOP (%)	Res. Tração na flexão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia. (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia. (%)
TERRAÇO	0	28	0%	8,780	8,04	2,46	30,55	11,41	12,00	3,00	25,00
				7,490				12,14			
				7,840				12,45			
				2,387				8,55			
			2,5%	3,491	2,43	1,71	70,30	8,20	8,95	3,28	36,62
				1,203				13,31			
				3,715				9,44			
				1,870				7,16			
			0%	1,902	7,65	2,39	31,32	7,03	6,85	2,27	33,10
				8,595				7,53			
				8,236				7,28			
				6,108				5,72			
	60	90	2,5%	5,201	6,23	2,73	43,90	2,88	3,87	2,15	55,70
				5,623				2,88			
				5,797				4,85			
				7,354				5,69			
			0%	5,657	7,98	2,45	30,66	4,68	5,82	2,09	35,90
				7,728				2,52			
				8,648				5,70			
				7,131				4,63			
			2,5%	8,159	5,41	2,55	47,08	7,13	4,32	2,28	52,68
				5,620				4,45			
				6,514				3,83			
				3,539				4,01			
	90	120	2,5%	4,887	5,41	2,55	47,08	5,13	4,32	2,28	52,68
				5,707				3,41			
				6,211				5,11			

Tabela 26 – Resistência à tração na flexão e Módulo de elasticidade das placas imersas parcialmente em água.

Ambiente	Tempo Exposição (dias)	Idade (dias)	Adição de FOP (%)	Res. Tração na flexão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia. (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia. (%)
IMERSÃO PARCIAL	0	28	0%	8,780	8,04	2,46	30,55	11,41	12,00	3,00	25,00
				7,490				12,14			
				7,840				12,45			
				2,387				8,55			
			2,5%	3,491	2,43	1,71	70,30	8,20	8,95	3,28	36,62
				1,203				13,31			
				3,715				9,44			
				1,870				7,16			
				1,902				7,03			
				8,132				3,30			
				7,478				3,39			
				8,376				4,89			
				6,836				5,04			
				6,425				4,66			
				5,106				3,54			
	60	90	2,5%	6,756	6,19	2,73	44,02	5,04	4,88	2,42	49,58
				5,911				6,07			
				6,122				4,94			
				8,018				5,47			
			0%	9,199	8,73	2,56	29,31	7,43	6,22	2,16	34,72
				8,973				5,76			
				7,255				4,05			
				6,401				3,79			
				8,181				4,54			
				7,282				6,29			
				6,029				4,47			
				6,446				5,16			
	90	120	2,5%		6,93	2,88	41,61		4,72	2,38	50,45

ANEXO D – Gráfico Tensão x Deformação

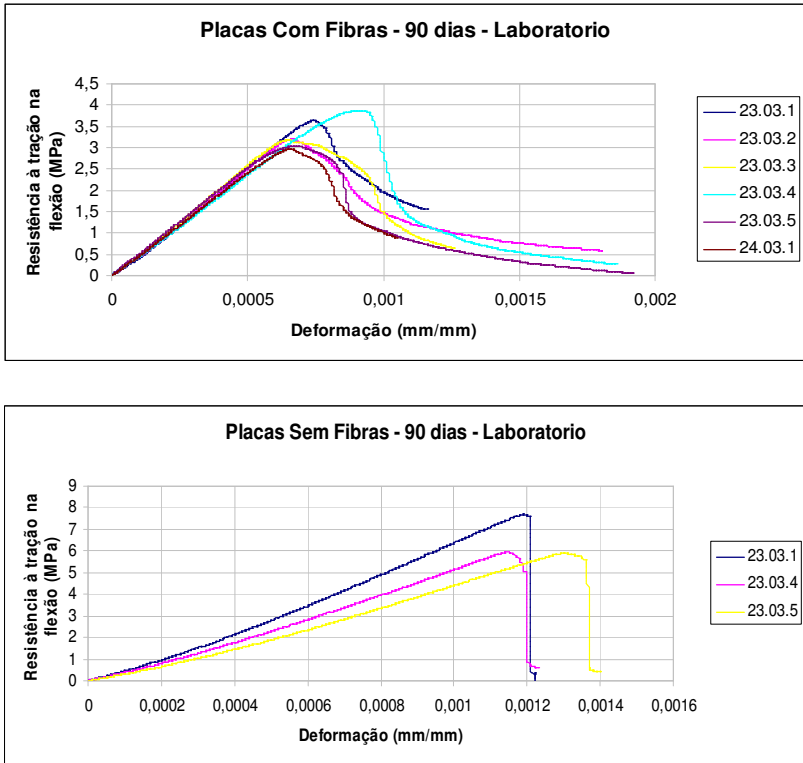


Figura 91 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas expostas no Laboratório.

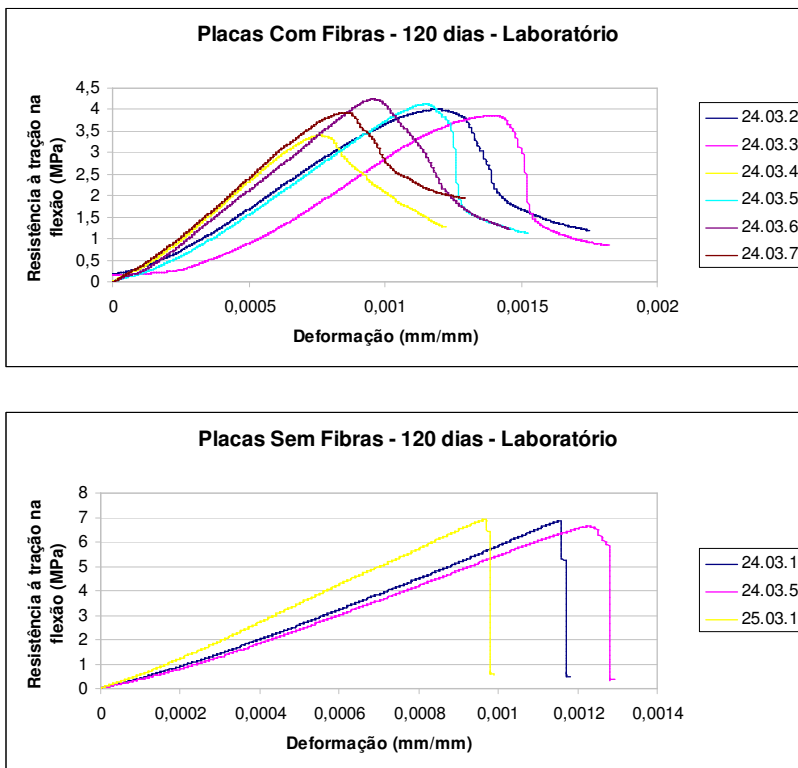


Figura 92 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas expostas no Laboratório.

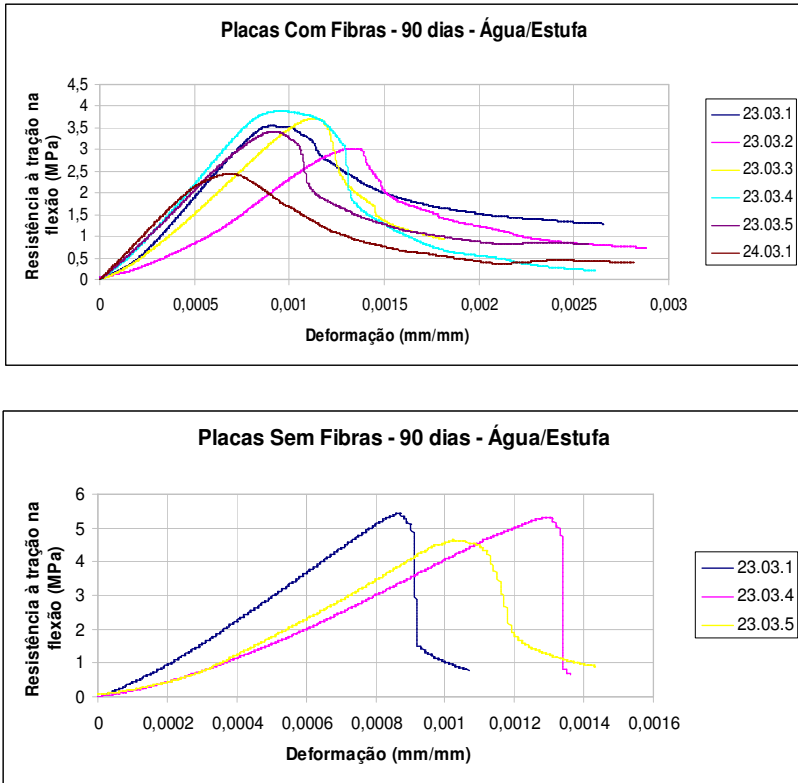


Figura 93 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas expostas em ciclos de secagem/molhagem.

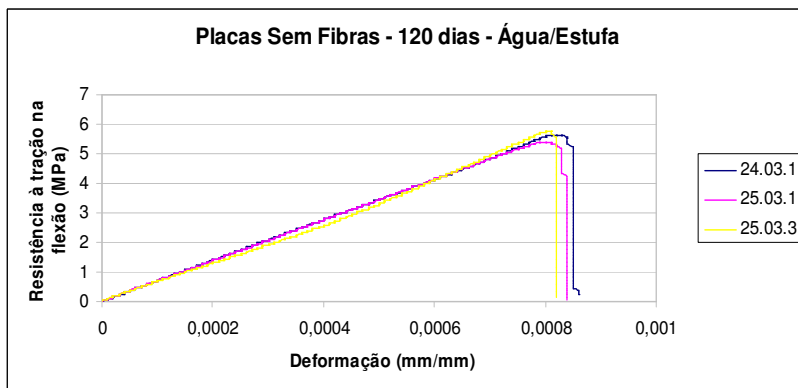
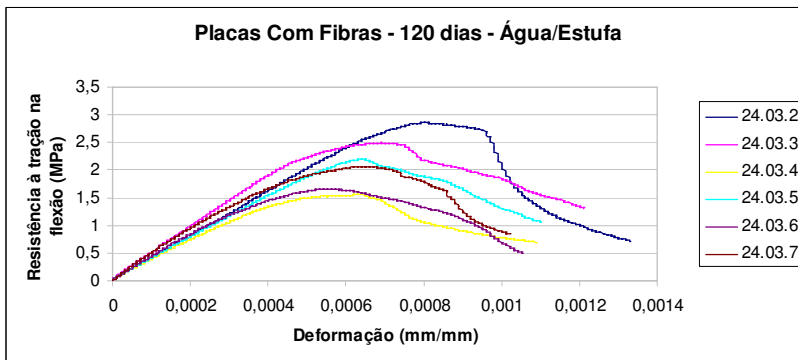


Figura 94 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas expostas em ciclos de secagem/molhagem.

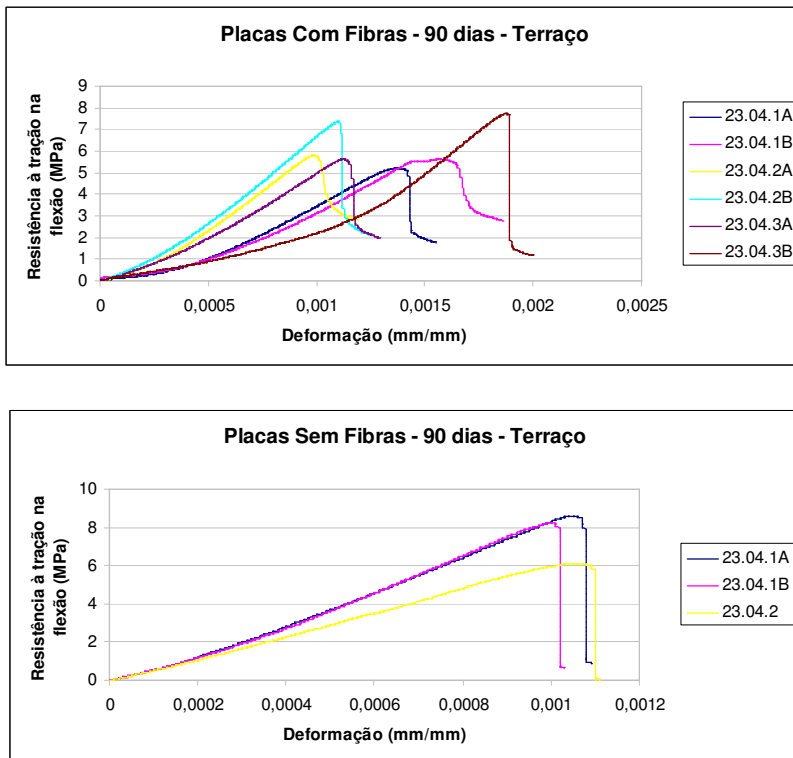


Figura 95 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas expostas no terraço.

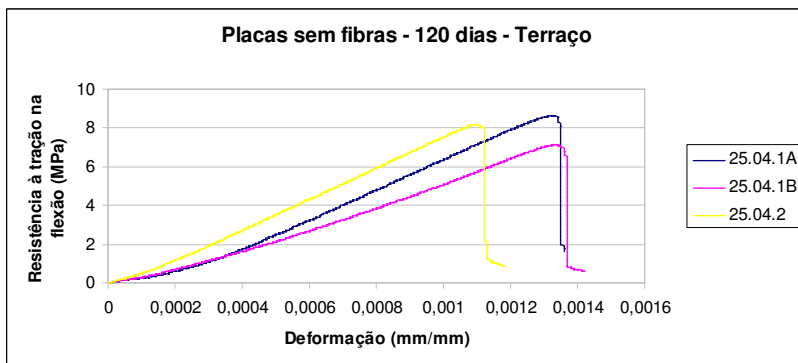
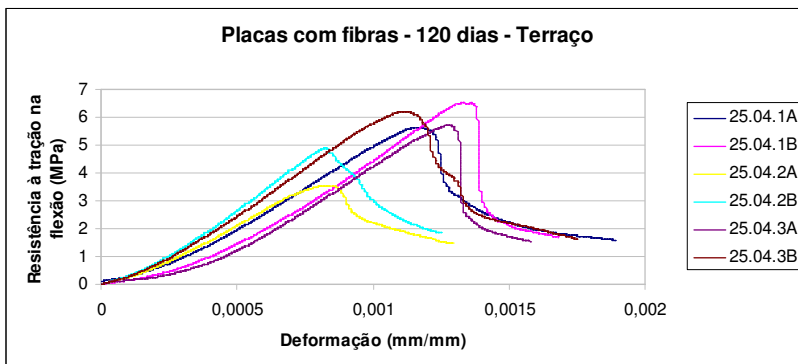


Figura 96 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas expostas no terraço.

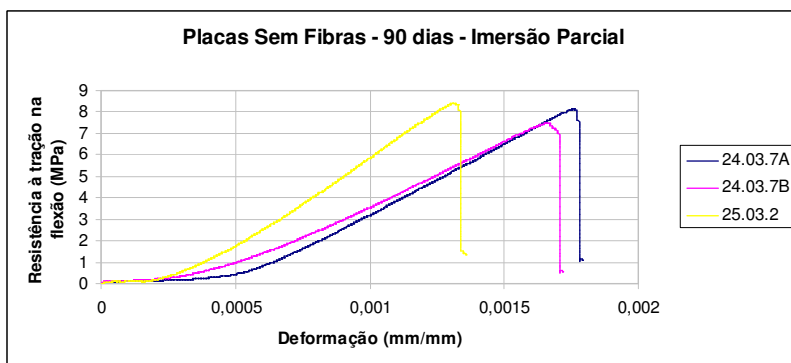
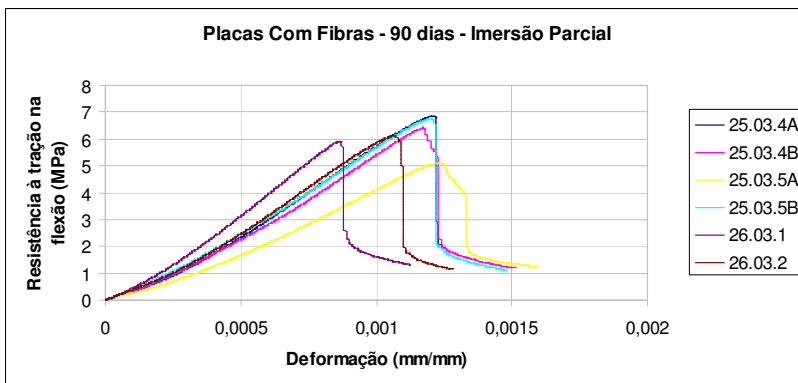


Figura 97 – Gráfico tensão x deformação aos 90 dias de idade das placas imersas parcialmente em água.

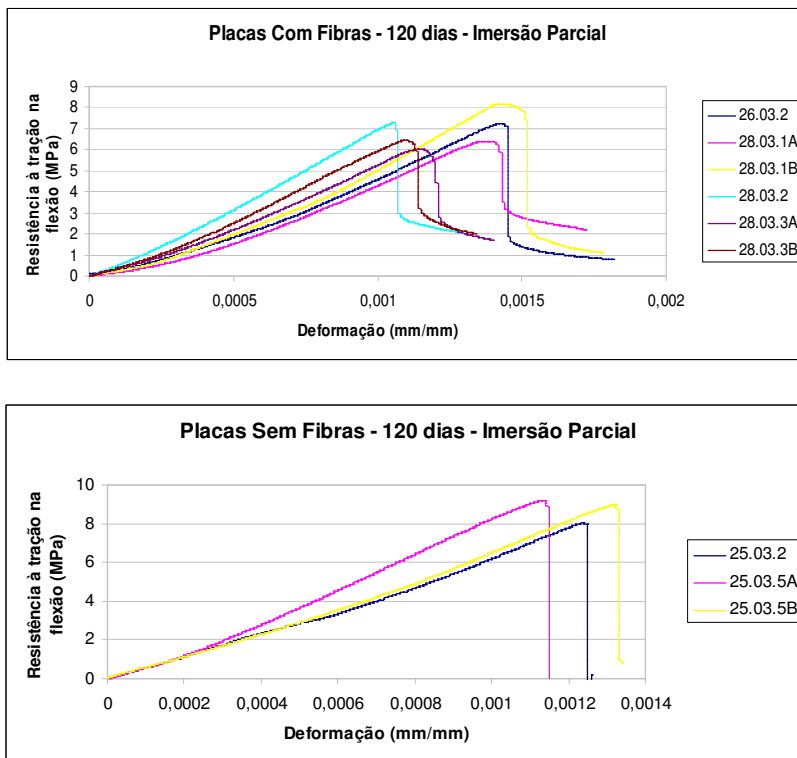


Figura 98 – Gráfico tensão x deformação aos 120 dias de idade das placas imersas parcialmente em água.

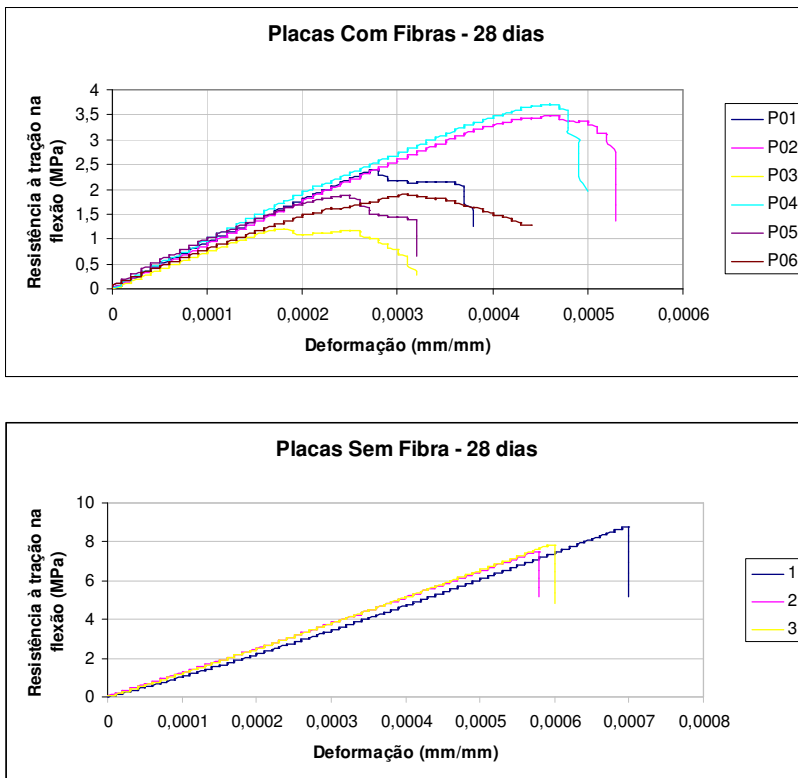


Figura 99 – Gráfico tensão x deformação das placas sem exposição e aos 28 dias de idade.

ANEXO E – Transmitância das Placas

Tabela 27 – Medidas em lux das placas expostas no laboratório.

LABORATORIO										
Temp. Idade	Cps	Leitura inicial (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
0 - 30 dias	23 - 03 - 1	20,57	20,35	20,28	20,19	20,15	20,31	18,23	4,68	25,65
	23 - 03 - 2	17,85	17,66	17,49	17,42	17,35	17,55			
	23 - 03 - 3	18,52	18,11	17,98	17,93	17,89	18,09			
	23 - 03 - 4	19,72	19,68	19,65	19,59	19,60	19,65			
	23 - 03 - 5	15,18	15,14	15,11	15,12	15,09	15,13			
	24 - 03 - 1	18,95	18,73	18,65	18,51	18,55	18,68			
0 - 30 dias	24 - 03 - 2	13,91	13,71	13,65	13,68	13,66	13,72	15,05	4,25	28,24
	24 - 03 - 3	15,31	15,07	14,93	14,88	14,90	15,02			
	24 - 03 - 4	16,51	16,41	16,32	16,30	16,25	16,36			
	24 - 03 - 5	14,96	14,85	14,79	14,68	14,66	14,79			
	24 - 03 - 6	15,49	15,46	15,41	15,39	15,30	15,41			
	24 - 03 - 7	15,20	15,04	14,96	14,91	14,86	14,99			
								16,64	4,26	25,60
Temp. Idade	Cps	Leitura final (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
60 - 90 dias	23 - 03 - 1	20,70	20,60	20,42	20,40	20,35	20,49	18,16	4,67	25,71
	23 - 03 - 2	16,57	16,42	16,31	16,30	16,32	16,38			
	23 - 03 - 3	18,37	18,16	18,01	17,95	17,92	18,08			
	23 - 03 - 4	20,21	19,89	19,76	19,71	19,43	19,80			
	23 - 03 - 5	15,72	15,57	15,73	15,69	15,54	15,65			
	24 - 03 - 1	18,79	18,71	18,41	18,36	18,44	18,54			
90 - 120 dias	24 - 03 - 2	14,72	14,59	14,37	14,34	14,33	14,47	15,66	4,34	27,68
	24 - 03 - 3	15,61	15,41	15,36	15,32	15,31	15,40			
	24 - 03 - 4	16,96	16,82	16,88	16,85	16,83	16,87			
	24 - 03 - 5	15,54	15,49	15,46	15,43	15,42	15,47			
	24 - 03 - 6	15,09	15,16	15,15	15,12	15,14	15,13			
	24 - 03 - 7	16,74	16,61	16,59	16,59	16,61	16,63			
								16,91	4,30	25,40

Tabela 28 – Medidas em lux das placas expostas em ciclos de secagem/molhagem.

ÁGUA / FORNO										
Temp. Idade	Cps	Leitura inicial (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
0 - 30 dias	23 - 03 - 1	17,61	17,46	17,32	17,28	17,28	17,39	17,81	4,62	25,96
	23 - 03 - 2	19,07	18,84	18,72	18,65	18,63	18,78			
	23 - 03 - 3	18,89	18,76	18,79	18,68	18,65	18,75			
	23 - 03 - 4	17,74	17,71	17,65	17,58	17,55	17,65			
	23 - 03 - 5	16,27	16,12	16,02	15,98	15,95	16,07			
	24 - 03 - 1	18,46	18,24	18,16	18,05	18,12	18,21			
0 - 30 dias	24 - 03 - 2	13,43	13,27	13,15	13,10	13,01	13,19	14,87	4,22	28,41
	24 - 03 - 3	14,06	13,81	13,80	13,81	13,72	13,84			
	24 - 03 - 4	16,55	16,57	16,42	16,35	16,17	16,41			
	24 - 03 - 5	15,10	15,00	14,88	14,87	14,82	14,93			
	24 - 03 - 6	15,39	15,28	15,26	15,19	15,17	15,26			
	24 - 03 - 7	15,70	15,60	15,52	15,50	15,51	15,57			
							16,34	4,22	25,84	
Temp. Idade	Cps	Leitura final (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
60 - 90 dias	23 - 03 - 1	18,33	18,26	17,94	17,83	17,76	18,02	16,96	4,51	26,60
	23 - 03 - 2	17,83	17,75	17,59	17,44	17,30	17,58			
	23 - 03 - 3	17,33	17,13	16,98	16,95	16,89	17,06			
	23 - 03 - 4	18,13	18,05	18,01	17,95	17,94	18,02			
	23 - 03 - 5	14,41	14,31	14,21	14,12	14,06	14,22			
	24 - 03 - 1	16,95	16,92	16,88	16,87	16,81	16,89			
90 - 120 dias	24 - 03 - 2	13,82	13,86	13,79	13,76	13,72	13,79	15,93	4,37	27,44
	24 - 03 - 3	14,79	14,54	14,49	14,48	14,45	14,55			
	24 - 03 - 4	17,77	17,65	17,58	17,51	17,45	17,59			
	24 - 03 - 5	16,29	16,15	16,13	16,12	16,13	16,16			
	24 - 03 - 6	16,55	16,49	16,19	16,21	16,18	16,32			
	24 - 03 - 7	17,49	17,15	17,07	17,11	17,09	17,18			
							16,45	4,24	25,75	

Tabela 29 - Medidas em lux das placas expostas no terraço.

TERRAÇO										
Temp. Idade	Cps	Leitura inicial (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
0 - 30 dias	23 - 04 - 1A	12,35	12,24	12,17	12,06	12,03	12,17	12,31	3,84	31,23
	23 - 04 - 2A	12,05	11,94	11,87	11,84	11,79	11,90			
	23 - 04 - 3A	13,24	13,05	12,98	12,94	12,86	13,01			
	25 - 04 - 1A	11,59	11,46	11,42	11,39	11,41	11,45			
	25 - 04 - 2A	12,54	12,40	12,35	12,33	12,28	12,38			
	25 - 04 - 3A	13,13	13,04	12,85	12,79	12,76	12,91			
0 - 30 dias	23 - 04 - 1B	10,58	10,43	10,37	10,31	10,31	10,40	11,25	3,67	32,65
	23 - 04 - 2B	9,67	9,62	9,51	9,46	9,45	9,54			
	23 - 04 - 3B	12,97	12,88	12,85	12,73	12,68	12,82			
	25 - 04 - 1B	10,18	10,08	10,03	10,01	10,01	10,06			
	25 - 04 - 2B	12,46	12,35	12,41	12,36	12,31	12,38			
	25 - 04 - 3B	12,54	12,33	12,29	12,24	12,22	12,32			
								11,78	3,58	30,43
Temp. Idade	Cps	Leitura final (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
60 - 90 dias	23 - 04 - 1A	13,14	13,07	12,97	12,93	12,94	13,01	12,50	3,87	30,98
	23 - 04 - 2A	11,23	11,16	11,09	11,05	11,07	11,12			
	23 - 04 - 3A	12,94	12,88	12,82	12,79	12,81	12,85			
	25 - 04 - 1A	10,52	10,41	10,38	10,35	10,36	10,40			
	25 - 04 - 2A	13,72	13,55	13,61	13,59	13,55	13,60			
	25 - 04 - 3A	14,15	14,08	13,99	14,01	13,97	14,04			
90 - 120 dias	23 - 04 - 1B	11,29	11,19	11,15	11,03	11,07	11,15	11,55	3,72	32,24
	23 - 04 - 2B	10,55	10,49	10,38	10,35	10,33	10,42			
	23 - 04 - 3B	11,76	11,64	11,58	11,55	11,53	11,61			
	25 - 04 - 1B	9,54	9,42	9,31	9,28	9,25	9,36			
	25 - 04 - 2B	13,64	13,51	13,48	13,45	13,41	13,50			
	25 - 04 - 3B	13,45	13,24	13,19	13,17	13,16	13,24			
								12,03	3,62	30,12

Tabela 30 - Medidas em lux das placas imersas parcialmente em água.

IMERSÃO PARCIAL										
Temp. Idade	Cps	Leitura inicial (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
0 - 30 dias	25 - 03 - 4A	15,44	15,38	15,31	15,27	15,25	15,33	15,36	4,29	27,95
	25 - 03 - 4B	14,65	14,57	14,47	14,46	14,49	14,53			
	25 - 03 - 5A	16,02	15,89	15,63	15,59	15,54	15,73			
	25 - 03 - 5B	16,41	16,13	15,98	15,92	15,88	16,06			
	26 - 03 - 1	15,97	15,88	15,80	15,74	15,71	15,82			
	26 - 03 - 2	14,82	14,71	14,71	14,67	14,64	14,71			
0 - 30 dias	26 - 03 - 2	12,15	11,93	11,82	11,75	11,74	11,88	13,28	3,99	30,06
	28 - 03 - 1A	12,03	11,93	11,96	12,01	11,95	11,98			
	28 - 03 - 1B	12,56	12,45	12,42	12,39	12,41	12,45			
	28 - 03 - 2	13,99	13,94	13,74	13,73	13,65	13,81			
	28 - 03 - 3A	14,73	14,64	14,58	14,62	14,52	14,62			
	28 - 03 - 3B	15,12	14,97	14,93	14,92	14,90	14,97			
							14,32	3,95	27,60	
Temp. Idade	Cps	Leitura final (lux)					media	media	Sd	cv (%)
		1	2	3	4	5				
60 - 90 dias	25 - 03 - 4A	14,83	14,60	14,54	14,52	14,51	14,60	14,87	4,22	28,41
	25 - 03 - 4B	14,35	14,25	14,19	14,12	14,18	14,22			
	25 - 03 - 5A	15,49	15,42	15,32	15,24	15,25	15,34			
	25 - 03 - 5B	15,05	14,91	14,77	14,76	14,78	14,85			
	26 - 03 - 1	16,54	16,41	16,35	16,31	16,24	16,37			
	26 - 03 - 2	13,96	13,86	13,78	13,72	13,78	13,82			
90 - 120 dias	26 - 03 - 2	13,28	13,33	13,25	13,22	13,23	13,26	14,74	4,21	28,53
	28 - 03 - 1A	13,53	13,54	13,53	13,52	13,53	13,53			
	28 - 03 - 1B	14,69	14,57	14,52	14,43	14,45	14,53			
	28 - 03 - 2	15,58	15,38	15,32	15,29	15,28	15,37			
	28 - 03 - 3A	14,77	14,71	14,67	14,65	14,67	14,69			
	28 - 03 - 3B	17,19	17,09	17,01	16,96	16,97	17,04			
							14,80	4,02	27,15	

Tabela 31 – Variação da Transmissão das placas no Laboratório e em Água/Estufa.

Ambiente Exposição	Placas	Área (cm ²)	n° FOP	n° FOP na placa	Área FOP na placa	Área FOP * (%) Área Placa	Transm. inicial (%)	Transm. final (%)
LABORATÓRIO	1	3,50	294	5381	5,94	9,28	3,38	3,42
	2	3,49	280	5130	5,66	8,85	2,93	2,73
	3	3,54	290	5236	5,78	9,03	3,01	3,01
	4	3,49	267	4891	5,40	8,44	3,27	3,30
	5	3,57	305	5464	6,03	9,43	2,52	2,61
	6	3,52	289	5256	5,80	9,07	3,11	3,09
	7	3,52	287	5217	5,76	9,00	2,29	2,41
	8	3,49	256	4690	5,18	8,09	2,50	2,57
	9	3,58	297	5304	5,85	9,15	2,73	2,81
	10	3,48	251	4616	5,10	7,96	2,46	2,58
	11	3,54	288	5200	5,74	8,97	2,57	2,52
	12	3,54	265	4785	5,28	8,25	2,50	2,77
ÁGUA/ESTUFA	13	3,51	300	5474	6,04	9,44	2,90	3,00
	14	3,60	298	5298	5,85	9,14	3,13	2,93
	15	3,33	295	5666	6,26	9,77	3,13	2,84
	16	3,48	257	4724	5,22	8,15	2,94	3,00
	17	3,61	334	5915	6,53	10,20	2,68	2,37
	18	3,60	291	5176	5,71	8,93	3,03	2,81
	19	3,53	225	4079	4,50	7,04	2,20	2,30
	20	3,53	206	3732	4,12	6,44	2,31	2,43
	21	3,49	285	5224	5,77	9,01	2,74	2,93
	22	3,49	281	5151	5,69	8,88	2,49	2,69
	23	3,45	266	4928	5,44	8,50	2,54	2,72
	24	3,50	243	4440	4,90	7,66	2,59	2,86

Tabela 32 – Variação da Transmissão das placas no terraço e em imersão parcial.

Ambiente Exposição	Placas	Área (cm ²)	nº FOP	nº FOP na placa	Área FOP na placa	Área FOP * (%) Área Placa	Transm. inicial (%)	Transm. final (%)
TERRAÇO	25	3,51	316	5770	6,37	9,95	2,03	2,17
	26	3,52	286	5201	5,74	8,97	1,98	1,85
	27	3,53	277	5018	5,54	8,66	2,17	2,14
	28	3,52	291	5292	5,84	9,13	1,91	1,73
	29	3,53	235	4257	4,70	7,34	2,06	2,27
	30	3,45	265	4913	5,42	8,47	2,15	2,34
	31	3,51	291	5313	5,87	9,16	1,73	1,86
	32	3,47	205	3785	4,18	6,53	1,59	1,74
	33	3,52	270	4910	5,42	8,47	2,14	1,94
	34	3,53	206	3732	4,12	6,44	1,68	1,56
	35	3,48	242	4451	4,91	7,68	2,06	2,25
IMERSÃO PARCIAL	36	3,53	254	4604	5,08	7,94	2,05	2,21
	37	3,52	232	4219	4,66	7,28	2,56	2,43
	38	3,53	192	3478	3,84	6,00	2,42	2,37
	39	3,52	247	4492	4,96	7,75	2,62	2,56
	40	3,56	240	4317	4,77	7,45	2,68	2,48
	41	3,52	267	4856	5,36	8,38	2,64	2,73
	42	3,53	237	4293	4,74	7,41	2,45	2,30
	43	3,63	277	4889	5,40	8,43	1,98	2,21
	44	3,63	297	5242	5,79	9,04	2,00	2,26
	45	3,56	226	4065	4,49	7,01	2,07	2,42
	46	3,49	258	4726	5,22	8,15	2,30	2,56
	47	3,49	279	5111	5,64	8,82	2,44	2,45
	48	3,57	300	5378	5,94	9,28	2,49	2,84

ANEXO F – Técnicas Experimentais para o Estudo da Microestrutura

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento que permite a obtenção de informações estruturais e químicas de amostras diversas. Conforme pode ser visto na Figura 93, consiste basicamente da coluna otico-eletrônica (canhão de elétrons e sistema de demagnificação), da unidade de varredura, da câmara de amostra, do sistema de detectores e do sistema de visualização da imagem.

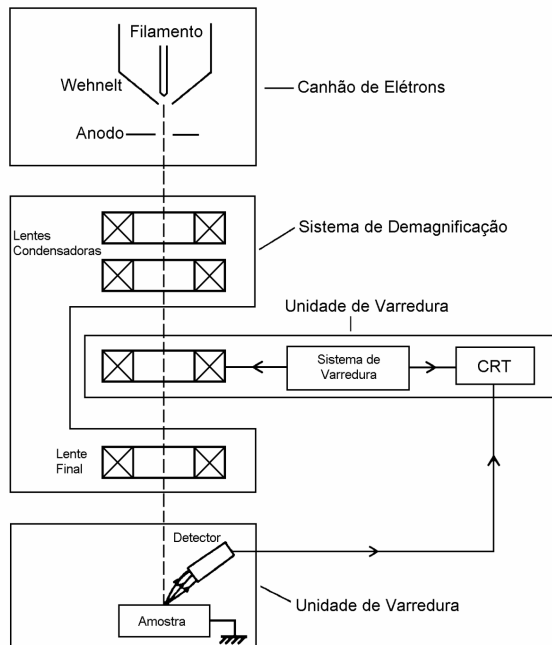


Figura 100 – Representação esquemática dos componentes do MEV.

Para Paulon (2005) O princípio da microscopia eletrônica de varredura é fundamentado na emissão de um feixe de elétrons por um filamento de tungstênio, que concentrado, controlado e reduzido por um sistema de lentes eletromagnéticas, diafragmas e bobinas, incide sobre uma amostra provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação do feixe de elétrons e a amostra sob condições de vácuo.

Os sinais emitidos encontram-se sob a forma de elétrons de tipo secundário, retroespalhados, absorvidos, transmitidos e difratados, e de fótons do tipo fotoluminescentes e raios X, os quais são captados por detectores apropriados, amplificados e processados em um sistema analisador de cada tipo de sinal, processos descritos a seguir. Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a formação de imagens são os elétrons secundários e os retroespalhados.

Ao microscópio eletrônico de varredura pode ser acoplado o sistema de EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras, a partir da emissão de raios X característicos. É possível identificar-se a composição de regiões com até 1 μm de diâmetro.

Na espectroscopia por energia dispersiva, os raios X são distribuídos no espectro por ordem de sua energia e, mais comumente, do baixo numero atômico (baixa energia) para o elevado (alta energia). A identificação de um espectro deve, portanto, iniciar sempre com os picos situados na parte final do espectro, pois é nessa região que se encontram as raia de maior energia e de melhor resolução (figura 94). O primeiro passo para analisar-se uma amostra desconhecida é a identificação dos elementos presentes, isto é, a análise qualitativa.

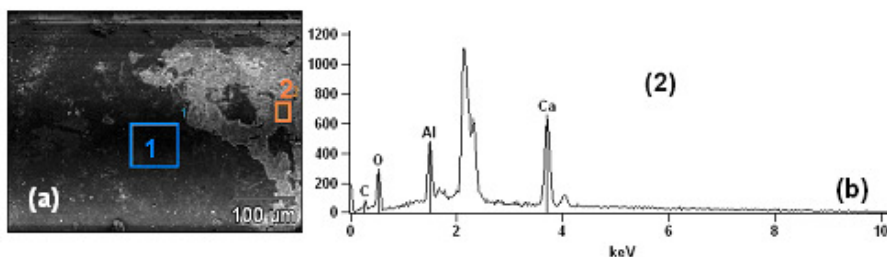


Figura 101 – Imagem em MEV da amostra de uma argamassa feita com cimento CP IV: (a) Área de análise (b) Espectro EDS da área 2.

Na microanálise química por energia dispersiva (EDS), considera-se que, acima de 10% em massa, um elemento esteja presente em grande quantidade; entre 1% e 10%, em pequena quantidade; e em menos de 1%, há apenas traços.

ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO

Para Carpena (2007) a espectroscopia de infravermelho pode ser usada para identificar um composto, determinar a composição de misturas, monitorar reações e fornecer informações úteis para deduzir a estrutura molecular. É uma das melhores ferramentas para obterem-se informações relativas à estrutura das moléculas. Essa técnica trabalha quase exclusivamente em ligações covalentes e é de amplo uso na química, especialmente na química orgânica (a maior utilidade da espectroscopia infravermelha encontra-se na identificação de moléculas orgânicas e organometálicas). Gráficos bem resolvidos podem ser produzidos com amostras de uma única substância com elevada pureza. Contudo, a técnica costuma ser usada para a identificação de misturas, já que sua alta seletividade torna possível a estimativa de um elemento em uma matriz complexa.

A espectroscopia de infravermelho é um tipo de espectroscopia de absorção a qual usa a região do infravermelho do espectro eletromagnético.

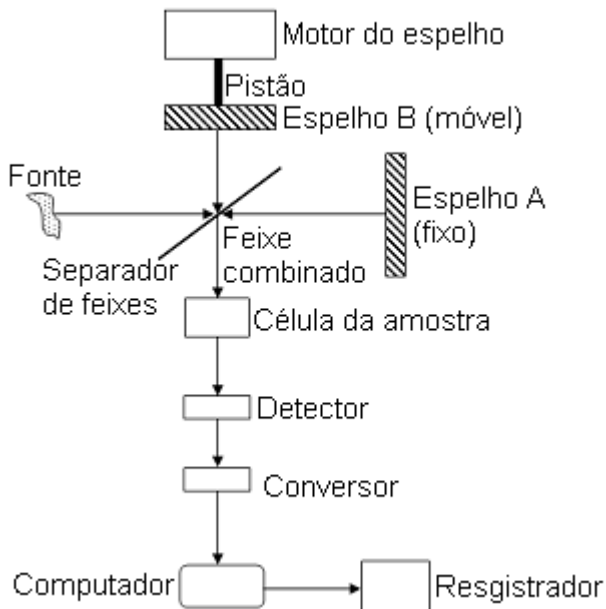


Figura 102 – Esquema de um espectrofotômetro de FT IR.

A técnica se baseia no fato de que as ligações químicas das substâncias possuem frequências de vibração específicas, as quais correspondem a níveis de energia molecular (chamados nesse caso de níveis vibracionais). Tais frequências dependem da forma da superfície de energia potencial da molécula, da geometria molecular, das massas dos átomos e, eventualmente, do acoplamento vibrônico. Se a molécula receber luz com exatamente a mesma energia de uma dessas vibrações, então a luz será absorvida. Para que uma vibração apareça no espectro infravermelho, a molécula precisa sofrer uma variação no seu momento dipolar durante essa vibração. A fim de se fazerem medidas em uma amostra, um raio monocromático de luz infravermelha é passado pela amostra, e a quantidade de energia absorvida é registrada. Repetindo-se essa operação ao longo de uma faixa de números de onda de interesse (normalmente $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$), um gráfico de energia absorvida versus frequência pode ser construído.